



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BARBARA MORAIS GIANESINI

**Uma proposta metodológica para a determinação do indicador de
contribuições harmônicas de agentes do sistema elétrico**

Uberlândia

2024

BÁRBARA MORAIS GIANESINI

**Uma proposta metodológica para a determinação do indicador de contribuições
harmônicas de agentes do sistema elétrico**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Dr. Ivan Nunes Santos

Uberlândia

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

G433 2024	<p>Gianesini, Bárbara Morais, 1994- Uma proposta metodológica para a determinação do indicador de contribuições harmônicas de agentes do sistema elétrico [recurso eletrônico] / Bárbara Morais Gianesini. - 2024.</p> <p>Orientador: Ivan Nunes Santos. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.265 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Santos, Ivan Nunes, 1979-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós- graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
--------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

BÁRBARA MORAIS GIANESINI

**Uma proposta metodológica para a determinação do indicador de contribuições
harmônicas de agentes do sistema elétrico**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Uberlândia, 05 de abril de 2024.

Banca Examinadora:

Ivan Nunes Santos – Prof. Dr. (UFU)

Paulo Fernando Ribeiro – Prof. Dr. (UNIFEI)

Roberto Perillo Barbosa da Silva – Prof. Dr. (UFMT)

José Carlos de Oliveira – Prof. Dr. (UFU)

Carlos Eduardo Tavares – Prof. Dr. (UFU)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 333, PPGEELT				
Data:	Cinco de abril de dois mil e vinte e quatro	Hora de início:	09h00	Hora de encerramento:	12h00
Matrícula do Discente:	12023EEL002				
Nome do Discente:	Bárbara Morais Giancesini				
Título do Trabalho:	Uma proposta metodológica para a determinação do indicador de contribuições harmônicas de agentes do sistema elétrico				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Ivan Nunes Santos. Título do projeto: Estudos para aplicação prática de procedimentos de compartilhamento de responsabilidade sobre as distorções harmônicas e análise de emissividade de fontes não lineares. Agência financiadora: Não se aplica. Número do processo na agência financiadora: Não se aplica. Vigência do projeto: 01/02/2021 - atual.				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Professores Doutores: José Carlos de Oliveira (UFU), Carlos Eduardo Tavares (UFU), Paulo Fernando Ribeiro (UNIFEI), Roberto Perillo Barbosa da Silva (UFMT) e Ivan Nunes Santos, orientador da discente.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Ivan Nunes Santos, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

APROVADA.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Perillo Barbosa da Silva, Usuário Externo**, em 05/04/2024, às 12:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Carlos de Oliveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/04/2024, às 12:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ivan Nunes Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/04/2024, às 12:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eduardo Tavares, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/04/2024, às 12:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Fernando Ribeiro, Usuário Externo**, em 05/04/2024, às 12:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5322479** e o código CRC **32750AA0**.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar saúde, sabedoria e guiar meus passos durante toda a trajetória do doutorado.

Ao meu orientador, Professor Ivan Nunes Santos, por me orientar de maneira paciente e incentivadora, e por não medir esforços para me auxiliar em todas as etapas da concretização deste trabalho.

Ao meu esposo Vinícius Henrique, pelo amor, paciência, compressão e por tornar mais leve essa jornada.

Aos meus pais, Edna Marcia e Gilnei, e a toda a minha família pelo amor incondicional, incentivo e suporte.

Aos meus amigos, que de perto e de longe torceram por mim.

Aos membros do Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica da UFU (LabQEE), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEELT) e a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) por proverem meios para a realização deste trabalho. Agradeço aos colegas, professores e técnicos administrativos da UFU.

Atesto que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*“Senhor, fazei de mim um instrumento de
Vossa paz!”*

Oração de São Francisco.

RESUMO

Os sistemas elétricos se apresentam constituídos por vários componentes com propriedades operacionais que exercem fortes impactos sobre os indicadores de qualidade da energia elétrica. Nesse tocante, como consequência da crescente proliferação de equipamentos não lineares em todos os níveis dos sistemas elétricos, os valores dos indicadores de distorção harmônica têm aumentado fortemente, o que tem tornado os problemas ocasionados por estas distorções mais críticos e frequentes. Devido aos impactos potencialmente prejudiciais dos harmônicos, tais fenômenos possuem limites regulamentados que garantem a operação segura e confiável dos sistemas elétricos, e a violação destes pode requerer medidas mitigatórias. Contudo, sabe-se que as distorções verificadas em um dado barramento resultam da combinação das emissões das fontes harmônicas das diversas instalações conectadas ao sistema elétrico. Objetivando a busca da identificação das parcelas de contribuição dos agentes para com as distorções existentes, surge a temática da determinação das contribuições harmônicas (HCD). Esta área tem sido amplamente explorada nestas últimas décadas, todavia, há de se reconhecer que ainda há lacunas que se mostram merecedoras de investigações e discussões, tanto no sentido de estabelecer métodos HCD consistentes, confiáveis, eficazes e que sejam factíveis de aplicação em campo, quanto com vistas à definição de um indicador que determine as contribuições harmônicas dos agentes conectados em barramentos de sistemas elétricos de potência. Neste contexto, essa tese objetiva avançar nos estudos e desenvolvimentos a respeito da proposição de uma metodologia que defina as parcelas de contribuição harmônica de agentes considerando a dinâmica de operação dos sistemas elétricos ao longo de períodos de análise. A metodologia proposta encontra-se dividida em duas partes: o estabelecimento de um protocolo de campanha de medição para aplicação de métodos HCD nos barramentos de interesse, e a definição, de fato, do indicador de contribuição harmônica a partir do tratamento estatístico dos dados de medição coletados em campo.

Palavras-chave: Campanha de medição. Compartilhamento de responsabilidade. Determinação da contribuição harmônica. Distorção harmônica. Indicador de contribuição harmônica. Protocolo de medição. Tratamento estatístico.

ABSTRACT

Electric power systems are composed of various components with operational properties that impact strongly on power quality indicators. Due to the increasing proliferation of nonlinear equipment at all levels of electrical systems, the harmonic distortion indicators have significantly risen, making issues related to these distortions more critical and frequent. Due to the potentially harmful effects of harmonics, these phenomena are subject to regulated limits that ensure the safe and reliable operation of electrical systems. Additionally, violations of these limits may require mitigation measures. However, it is known that the distortions measured at a given busbar result from the combination of harmonic emissions from various installations connected to the electrical system. With the goal of identifying the contributions of electrical agents to the existing distortions, the theme of harmonic contribution determination (HCD) arises. This area has been extensively explored in recent decades, but it is worth recognizing that there are still research gaps requiring further investigation and discussion. This includes the establishment of consistent, reliable, and effective HCD methods feasible for field application and the definition of an index for determining harmonic contributions in electrical power systems. In this context, this Ph.D. dissertation aims to advance in the studies and developments related to the proposition of a methodology that defines the agents' harmonic contribution portions considering the operating dynamics of electrical systems over periods of analysis. The proposed methodology is composed of two parts: the establishment of a measurement campaign protocol for applying HCD methods on the busbars of interest, and the definition of the harmonic contribution index based on the statistical treatment of collected data from in the measurement campaign.

Keywords: Measurement campaign. Sharing of responsibility. Harmonic contribution determination. Harmonic distortions. Harmonic contribution index. Measurement protocol. Statistical treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distorções harmônicas de tensão e corrente medidas em um ponto de acoplamento comum (PAC) conectando um consumidor a um sistema supridor.	22
Figura 2 – PAC conectando um consumidor a um sistema supridor: (a) circuito equivalente de Norton. (b) Aplicação do princípio da superposição.	30
Figura 3 – Diagrama fasorial das contribuições de tensão e projeções na (a) situação em que as projeções possuem o mesmo sentido, na (b) situação em que uma das projeções é nula, e na (c) situação em que as projeções apresentam sentidos contrários.	31
Figura 4 – Circuito equivalente de Norton de um PAC conectando um consumidor a um sistema supridor com uma impedância dominante ON (filtro passivo).	33
Figura 5 – Diagrama fasorial das correntes drenadas pelo FPS e projeções sobre a corrente total do FPS.	34
Figura 6 – Circuito equivalente de Norton de um PAC conectando um consumidor a um sistema supridor com um banco de capacitores ON.	35
Figura 7 – Diagrama fasorial das fontes de corrente e projeções sobre $IS - h + IC - h$	36
Figura 8 – Circuito equivalente de Norton de um PAC conectando um consumidor a um sistema supridor considerando a injeção de uma corrente harmônica.	38
Figura 9 – Circuito equivalente de Norton de um PAC conectando um consumidor a um sistema supridor quando o consumidor está desconectado.	39
Figura 10 – (a) Circuito equivalente de Norton de um PAC conectando um consumidor a um sistema supridor evidenciando o isolamento harmônico devido à injeção de corrente harmônica pelo filtro ativo. (b) Representação de um filtro ativo conectado ao PAC, entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica h	41
Figura 11 – Circuito equivalente de Norton de um PAC conectando um consumidor a um sistema supridor evidenciando o isolamento harmônico devido à injeção de corrente harmônica pelo filtro ativo – FA do lado do sistema supridor.	43
Figura 12 – Sistema teste de referência para estudos sobre a determinação das contribuições harmônicas do IEEE (IEEE-BTS-HCD).	51
Figura 13 – IEEE-BTS-HCD implementado no MATLAB/ <i>Simulink</i>	54
Figura 14 – IEEE-BTS-HCD implementado no MATLAB/ <i>Simulink</i> considerando a aplicação de métodos HCD.	56
Figura 15 – Fasores de contribuição do sistema supridor $VS - PAC - h$ e consumidor $VC - PAC - h$ sobre a tensão harmônica do PAC $VPAC - h$ obtidos pelo MVH para o IEEE-BTS-HCD - Condição A (a) PAC 01 e (b) PAC 03.	59
Figura 16 – Fasores de contribuição do sistema supridor $VS - PAC - h$ e consumidor $VC - PAC - h$ sobre a tensão harmônica do PAC $VPAC - h$ obtidos pelo MVH para o IEEE-BTS-HCD - Condição B (a) PAC 01 e (b) PAC 03.	61

Figura 17 – Fasores de contribuição do sistema supridor $VS - PAC - h$ e consumidor $VC - PAC - h$ sobre a tensão harmônica do PAC $VPAC - h$ obtidos pelo MVH para o IEEE-BTS-HCD - Condição C (a) PAC 01, (b) PAC 02 e (c) PAC 03.....	63
Figura 18 – Fasores de contribuição do sistema supridor $VS - PAC - h$ e consumidor $VC - PAC - h$ sobre a tensão harmônica do PAC $VPAC - h$ obtidos pelo MVH para o IEEE-BTS-HCD - Condição A-BG (a) PAC 01 e (b) PAC 03.....	65
Figura 19 – Fasores de contribuição do sistema supridor $VS - PAC - h$ e consumidor $VC - PAC - h$ sobre a tensão harmônica do PAC $VPAC - h$ obtidos pelo MVH para o IEEE-BTS-HCD - Condição B-BG (a) PAC 01 e (b) PAC 03.....	67
Figura 20 – Fasores de contribuição do sistema supridor $VS - PAC - h$ e consumidor $VC - PAC - h$ sobre a tensão harmônica do PAC $VPAC - h$ obtidos pelo MVH para o IEEE-BTS-HCD - Condição C-BG (a) PAC 01, (b) PAC 02 e (c) PAC 03.....	69
Figura 21 – Incerteza de medição no plano complexo. Vh é o fasor real, Vm é o fasor medido, ΔV representa o erro de magnitude e $\Delta\varphi$ é o erro no ângulo de fase.	73
Figura 22 – Sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição - Caso A.	74
Figura 23 – Sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição - Caso B.	75
Figura 24 – Sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição - Caso C.	75
Figura 25 – Sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição - Caso A-BG.	76
Figura 26 – Sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição - Caso B-BG.....	76
Figura 27 – Sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição - Caso C-BG.....	77
Figura 28 – Exemplo de intervalo entre mudanças de estado para aplicação do método HCD.	84
Figura 29 – Exemplo de conexão de medidores de uma campanha de aplicação em um PAC que conecta dois agentes (supridor e consumidor).....	87
Figura 30 – Exemplo de campanha de aplicação de método HCD.	89
Figura 31 – Combinações dos conjuntos de Medições Pré e Medições Pós para o cálculo dos índices de contribuição.	92
Figura 32 – Diagrama unifilar simplificado do local de avaliação.....	97
Figura 33 – Avaliação prévia dos níveis de distorção harmônica no PAC. (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C.	97
Figura 34 – Diagrama trifilar do FMBT.....	99
Figura 35 – FMBT.....	100
Figura 36 – Diagrama unifilar da rede e local de conexão do FMBT.....	101
Figura 37 – Diagrama de conexão dos medidores de QEE.....	103
Figura 38 – Alocação dos medidores de QEE em campo.	104
Figura 39 – Conjuntos de índice de contribuição de 5ª ordem (Fase A) para os 3 primeiros dias da campanha de aplicação.	106
Figura 40 – Conjuntos de índice de contribuição de 5ª ordem (Fase A) para os 3 primeiros dias da campanha de aplicação – após expurgos de $CV > 10\%$	107

Figura 41 – Índices de contribuição harmônica de tensão de 5ª ordem dos agentes (Fase A) para os 3 primeiros dias da campanha de aplicação.	108
Figura 42 – Índices de contribuição harmônica de tensão de 5ª ordem dos agentes para a campanha de aplicação de 7 dias. (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C.	109
Figura 43 – Índices de contribuição harmônica de tensão de 5ª ordem dos agentes para a campanha de aplicação de 7 dias. (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C – Após aplicação do Percentil 95.	110
Figura 44 – Impedâncias harmônicas medidas no IEEE-BTS-HCD - Condição A.	140
Figura 45 – Impedâncias harmônicas medidas no IEEE-BTS-HCD - Condição B.	140
Figura 46 – Impedâncias harmônicas medidas no IEEE-BTS-HCD - Condição C.	141
Figura 47 – Impedâncias harmônicas medidas no IEEE-BTS-HCD - Condição A-BG.	141
Figura 48 – Impedâncias harmônicas medidas no IEEE-BTS-HCD - Condição B-BG.	142
Figura 49 – Impedâncias harmônicas medidas no IEEE-BTS-HCD - Condição C-BG.	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de requisitos de aplicação prática dos métodos HCD selecionados. .	48
Tabela 2 – Visão geral das três condições de operação do IEEE-BTS-HCD.....	52
Tabela 3 – Distorções pré-existentes incluídas na Rede AT.	52
Tabela 4 – Distorções harmônicas de tensão, individuais e totais, do IEEE-BTS-HCD.	53
Tabela 5 – Limites para os indicadores de distorção de tensão entre 1 kV e 69 kV no Brasil.	55
Tabela 6 – Métodos HCD aplicados ao IEEE-BTS-HCD - Condição A.	60
Tabela 7 – Métodos HCD aplicados ao IEEE-BTS-HCD - Condição B.....	62
Tabela 8 – Métodos HCD aplicados ao IEEE-BTS-HCD - Condição C.....	64
Tabela 9 – Métodos HCD aplicados ao IEEE-BTS-HCD - Condição A-BG.	66
Tabela 10 – Métodos HCD aplicados ao IEEE-BTS-HCD - Condição B-BG.....	68
Tabela 11 – Métodos HCD aplicados ao IEEE-BTS-HCD - Condição C-BG.....	70
Tabela 12 – Relação $ZC - hZS - h$ para as condições de operação do IEEE-BTS-HCD.....	72
Tabela 13 – Dados gerais do FMBT.....	100
Tabela 14 – Sintonias do FMBT para a 5ª ordem harmônica.....	102
Tabela 15 – Características dos medidores de QEE Fluke 435 série II.....	103
Tabela 16 – Indicadores de contribuição harmônica.	111
Tabela 17 – Fasores de contribuição obtidos pelos Métodos HCD. IEEE-BTS-HCD - Condição A.	134
Tabela 18 – Fasores de contribuição obtidos pelos Métodos HCD. IEEE-BTS-HCD - Condição B.	135
Tabela 19 – Fasores de contribuição obtidos pelos Métodos HCD. IEEE-BTS-HCD - Condição C.	136
Tabela 20 – Fasores de contribuição obtidos pelos Métodos HCD. IEEE-BTS-HCD - Condição A-BG.	137
Tabela 21 – Fasores de contribuição obtidos pelos Métodos HCD. IEEE-BTS-HCD - Condição B-BG.....	138
Tabela 22 – Fasores de contribuição obtidos pelos Métodos HCD. IEEE-BTS-HCD - Condição C-BG.....	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Amperes
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta tensão
BC	Banco de capacitor
BG	distorções pré-existentes (<i>background distortions</i>)
BSS	<i>Blind Source Separation</i>
BT	Baixa tensão
BTS	<i>Benchmark test system</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CB	Cabo
CH	Índice de contribuição harmônica
CICA	Análise de componentes independentes complexos (<i>Complex Independent Component Analysis</i>)
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
CV	Coefficiente de variação de Pearson
DTH _h	Distorção de tensão harmônica individual de ordem <i>h</i>
DTHT	Distorção de tensão harmônica total
DTT _i	Distorção harmônica total de tensão para componentes ímpares não múltiplos de 3
F	Farad
<i>f</i>	Frequência
FA	Filtro ativo
FACTS	Flexible AC transmission system
FHP	Filtro harmônico passivo
FMBT	Filtro multissintonizado de baixa tensão
fp	Fator de potência
FPS	Filtro passivo sintonizado
FSV	Fator de severidade de violação
GPS	<i>Global positioning system</i>
h	Ordem harmônica
H	Henry
HCD	<i>Harmonic contribution determination</i>

Hz	Hertz
ID	Índice de dominância
IEC	<i>International Electrotechincal Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEEE-BTS-HCD	<i>IEEE Benchmark Test System for Harmonic Contribution Determination Studies</i>
k	Quilo
LabQEE	Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica
LT	Linha de transmissão
m	Mili
M	Mega
MCC	Método do Chaveamento de Capacitor
MCICA	Método da Análise de Componentes Independentes Complexas
MICH	Método da Injeção de Corrente Harmônica
MID	Método da Impedância Dominante
MIEC	Método da IEC
MIEC-M	Método da IEC Modificado
Min	Minuto
MFA	Método do Filtro Ativo
MT	Média tensão
MVH	Método do Vetor Harmônico (Método da Superposição)
OFF	Desligado
ON	Ligado
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC	Ponto de acoplamento comum
P&D	Pesquisa e desenvolvimento
PES	<i>Power and Energy Society</i>
PMU	<i>Phasor measurement unit</i> - Unidade de medição fasorial
PPGEELT	Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica
QEE	Qualidade da energia elétrica
QGBT	Quadro geral de baixa tensão
RMS	<i>Root mean square</i>
SBQEE	Sociedade Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica
Seg	Segundo

TAP	Derivações
TC	Transformador de corrente
TR	Transformador
UFMT	Universidade Federal do Mato Grosso
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
V	Volt
VA	Volt-ampère
VAr	Volt-ampère reativo
VTCD	Varição de tensão de curta duração
W	Watt
μ	Micro
\Re	Parte real
Σ	Somador

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Objetivos e contribuições da tese	24
1.2 Estrutura da tese	24
2 ESTADO DA ARTE SOBRE A TEMÁTICA DA DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES HARMÔNICAS	26
2.1 Considerações iniciais	26
2.2 Métodos para determinação das contribuições harmônicas	26
2.3 Descrição dos métodos HCD selecionados para avaliação computacional	29
2.3.1 Método da Superposição ou Método do Vetor Harmônico (MVH)	29
2.3.2 Método da Impedância Dominante (MID)	33
2.3.3 Método do Chaveamento de Capacitor (MCC)	35
2.3.4 Método da Injeção de Corrente Harmônica (MICH)	37
2.3.5 Método da IEC (MIEC)	39
2.3.6 Método do Filtro Ativo (MFA)	40
2.3.7 Método da Análise de Componentes Independentes Complexas (MCICA)	44
2.4 Considerações finais	47
3 AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES HARMÔNICAS NO <i>IEEE BENCHMARK TEST SYSTEM</i>	49
3.1 Considerações iniciais	49
3.2 Sistema teste de referência para estudos sobre a determinação das contribuições harmônicas do IEEE	49
3.3 Aplicação dos métodos HCD no IEEE-BTS-HCD	55
3.4 Resultados da aplicação dos métodos HCD selecionados no IEEE-BTS-HCD	57
3.4.1 Condição A	58
3.4.2 Condição B	60
3.4.3 Condição C	62
3.4.4 Condição A-BG	65
3.4.5 Condição B-BG	66

3.4.6	Condição C-BG	68
3.4.7	Discussão geral acerca dos resultados	70
3.5	Análise de sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição	73
3.6	Considerações finais	78
4	PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DO INDICADOR DE CONTRIBUIÇÃO HARMÔNICA	80
4.1	Considerações iniciais	80
4.2	Campanha de aplicação do método HCD	81
4.2.1	Avaliação preliminar do conteúdo harmônico no PAC	81
4.2.2	Escolha do método HCD	82
4.2.3	Definição das ordens harmônicas de interesse	83
4.2.4	Intervalo entre as aplicações do método HCD	84
4.2.5	Duração da campanha de aplicação	85
4.2.6	Medidores e transdutores	86
4.2.7	Grandezas medidas e período de integralização das medições	87
4.3	Cálculo do indicador de contribuição harmônica	88
4.3.1	Cálculo dos índices de contribuição a cada aplicação do método HCD	89
4.3.2	Critérios de expurgo	92
4.3.3	Aplicação do Percentil 95	93
4.3.4	Determinação do indicador	93
4.4	Considerações finais	95
5	DETERMINAÇÃO DO INDICADOR DE CONTRIBUIÇÃO HARMÔNICA DE AGENTES CONECTADOS A UM PAC REAL: ESTUDO DE CASO	96
5.1	Considerações iniciais	96
5.2	Campanha de aplicação do método HCD	96
5.2.1	Local de avaliação	96
5.2.2	Avaliação preliminar do conteúdo harmônico no PAC	97
5.2.3	Definição das ordens harmônicas de interesse	98
5.2.4	Escolha do método HCD	98
5.2.5	Intervalo entre as aplicações do método HCD	102
5.2.6	Duração da campanha de aplicação	102

5.2.7 Medidores e transdutores	102
5.2.8 Grandezas medidas e período de integralização das medições	104
5.3 Cálculo do indicador de contribuição harmônica	105
5.3.1 Cálculo dos índices de contribuição a cada aplicação do método HCD	105
5.3.2 Determinação do indicador	111
5.4 Considerações finais	112
6 CONCLUSÕES	113
REFERÊNCIAS	116
APÊNDICE A. RESULTADOS DOS FASORES DE CONTRIBUIÇÃO OBTIDOS PELOS MÉTODOS HCD - IEEE-BTS-HCD	133
APÊNDICE B. IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS - IEEE-BTS-HCD	140
APÊNDICE C. PRODUTOS	143

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos atuais, em todo o mundo, contemplam um expressivo número de componentes com características não lineares em níveis de geração, transmissão e distribuição, bem como nas unidades consumidoras residenciais, comerciais e industriais. Alguns exemplos de equipamentos não lineares utilizados em unidades consumidoras são: controladores de velocidade de motores, fontes eletronicamente chaveadas para equipamentos eletrônicos, sistemas de iluminação LED e carregadores de veículos elétricos [1], [2], [3]. Também se destacam os trens-unidade elétricos [4], conectados em nível de distribuição ou transmissão. Ainda em nível de transmissão, existem controladores FACTS (*Flexible AC Transmission System*) [5], bem como elos de transmissão em corrente contínua [6], a exemplo dos adotados em países como Brasil [7] e China [8] para transmissão de energia em longas distâncias. Neste panorama, também cresce de maneira exponencial a geração de energia, centralizada e distribuída, por fontes com tais características no mundo, nos quais se enquadram os complexos eólicos e solares fotovoltaicos [9], [10], [11], [12], [13].

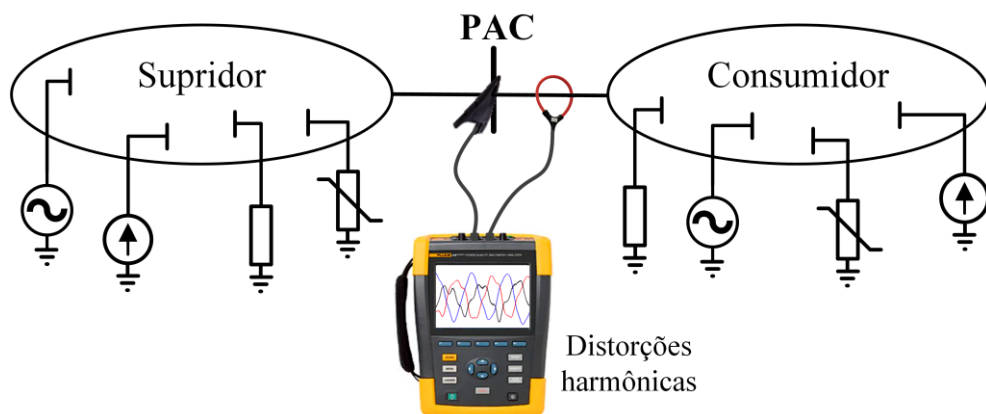
Sabe-se ainda que a presença de equipamentos com características não lineares ocasiona deformações nas formas de onda, idealmente senoidais, das correntes e, por conseguinte, das tensões nos sistemas elétricos. Tais deformações são definidas como distorções harmônicas pelas suas características de sinais com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental dos sistemas [14]. Portanto, como consequência da crescente proliferação de equipamentos não lineares, os níveis de distorção harmônica em todos os níveis dos sistemas elétricos têm aumentado fortemente em diversos países incluindo o Brasil, o que têm tornado os problemas ocasionados pelas distorções harmônicas mais frequentes e críticos [4], [15], [16], [17], [18], [19]. Além dos conhecidos harmônicos de baixa ordem, recentemente estão sendo verificadas emissões em frequências muito elevadas (acima de 2 kHz), os chamados supra-harmônicos [20].

A preocupação com o aumento dos níveis de harmônicos se justifica, especialmente, pelos impactos potencialmente prejudiciais que as distorções de tensão e corrente podem causar na confiabilidade, segurança e vida útil de equipamentos diversos existentes nos sistemas elétricos [2], [14], [21]. Inclusive, a propagação das distorções harmônicas pela rede elétrica pode trazer impactos em pontos distantes, caso haja amplificação dos efeitos. Assim, objetivando regulamentar a matéria, são estabelecidos documentos normativos que abordam recomendações e preconizam limites para os níveis de distorção harmônica [22], [23], [24], [25].

Diante deste cenário, uma vez constatadas violações dos limites preconizados, medidas mitigatórias devem ser consideradas e implementadas para manter os níveis harmônicos sob controle. Entretanto, sabe-se que as distorções harmônicas de tensão e corrente verificadas em um dado barramento, ou ponto de acoplamento comum (PAC), estão associadas com a interação entre diversas fontes harmônicas, isto é, resultam da combinação das emissões harmônicas das diversas instalações existentes no sistema elétrico. Ainda, os níveis de distorção apresentam, na grande maioria das vezes, um comportamento dinâmico ao longo do tempo.

Tomando como exemplo a Figura 1, considera-se que o sistema supridor possui tensão pré-distorcida, pois em geral existe uma diversidade de cargas e equipamentos causadores de distorções conectados a ele, e a unidade consumidora é constituída por cargas e equipamentos lineares e não lineares. Portanto, nessa situação, é evidente que as distorções harmônicas verificadas no PAC são resultantes da interação das diversas fontes harmônicas existentes em ambas as partes. Ao longo deste trabalho, os agentes conectados aos PACs são tratados como supridores e consumidores. Entretanto, essas instalações podem figurar diferentes agentes que estão conectados à rede elétrica, dentre os quais podem ser citados a rede básica, concessionárias de distribuição, unidades geradoras, cargas especiais, elos de corrente contínua, entre outros.

Figura 1 – Distorções harmônicas de tensão e corrente medidas em um ponto de acoplamento comum (PAC) conectando um consumidor a um sistema supridor.



Fonte: Autoria própria.

Reconhecendo estes aspectos, há de se considerar que, muitas vezes, as soluções requeridas para o problema das distorções harmônicas podem se apresentar como medidas dispendiosas sob o ponto de vista financeiro e, diante deste fato, podem ocorrer conflitos entre as partes sobre a responsabilidade de aquisição e implantação das soluções. Em consonância com tais questões, surge a motivação para a busca de procedimentos que permitam, de forma

consistente e segura, estabelecer as contribuições dos agentes envolvidos para com a distorção existente em um PAC e que possam, conseqüentemente, conduzir a uma divisão justa das responsabilidades técnicas e respectivas implicações econômicas correlatas à solução dos problemas encontrados.

Esta temática é comumente chamada de compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, ou determinação das contribuições harmônicas, do inglês *harmonic contribution determination* (HCD). O assunto em pauta tem sido amplamente explorado nestes últimos anos, fato este constatado por um grande número de publicações e pesquisas relatados na literatura especializada ao longo dos anos [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32]. O Capítulo 2 será dedicado a apresentar o estado atual da arte, principalmente no que tange aos métodos e procedimentos propostos para determinar as contribuições harmônicas de instalações dos sistemas elétricos de potência. Esses métodos são tratados ao longo do texto como métodos HCD.

Apesar dos avanços e das promissoras possibilidades apresentadas neste campo de estudo, há de se reconhecer que ainda há lacunas que se mostram merecedoras de investigações e discussões, tanto no sentido de estabelecer métodos HCD consistentes, confiáveis, eficazes e que sejam factíveis de aplicação em campo, quanto com vistas a definir um processo sistematizado para determinar as contribuições, isto é, a definição de um indicador de contribuição harmônica que leve em consideração as particularidades dos métodos HCD, bem como a dinâmica de operação dos sistemas elétricos de potência.

Ademais, a importância dessa temática se reflete no estabelecimento de grupos de trabalho do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* (CIGRE) dedicados a estudá-la, como a *IEEE PES Task Force on Harmonic Modeling and Simulation* que desenvolveu um sistema teste referência (*IEEE Benchmark Test System for Harmonic Contribution Determination Studies – IEEE-BTS-HCD*) [33] para padronizar a avaliação e facilitar a comparação de diferentes métodos HCD via simulações, e o *CIREN/CIGRE working group C4.42: Continuous assessment of low-order harmonic emissions from customer Installations* que tem desenvolvido artigos e está preparando uma brochura técnica que objetiva tanto revisar a literatura e práticas atuais, quanto propor diretrizes para o monitoramento on-line e avaliação contínua das emissões (contribuições) harmônicas provocadas por instalações contidas na rede elétrica.

1.1 Objetivos e contribuições da tese

A partir do contexto apresentado, esta tese tem o objetivo principal de avançar nos estudos e desenvolvimentos correlatos à temática da determinação das contribuições harmônicas, visando, assim, a proposição de um indicador de contribuição harmônica para os agentes conectados a um dado PAC do sistema elétrico de potência.

De forma a alcançar a meta estabelecida, os seguintes objetivos específicos podem ser elencados:

- Apresentação do estado da arte atual da temática da determinação das contribuições harmônicas;
- Aperfeiçoamento da implementação, no ambiente gráfico MATLAB/Simulink, do sistema elétrico IEEE-BTS-HCD por meio da automatização da execução de simulações via scripts;
- Avaliação computacional, utilizando o sistema elétrico IEEE-BTS-HCD, dos principais métodos para a determinação das contribuições harmônicas, com o intuito de analisar de forma pioneira o desempenho de distintos métodos frente a várias condições de operação e verificar a sensibilidade destes a erros de medição;
- Estabelecimento de uma metodologia consistente e prática para definir um indicador de contribuição harmônica de agentes conectados a PACs em sistemas elétricos de potência visando o compartilhamento das responsabilidades sobre os custos financeiros vinculados à implantação de medidas mitigatórias de harmônicos ou a penalização dos agentes poluidores.

1.2 Estrutura da tese

Visando atingir os objetivos ora expostos, além do presente capítulo introdutório, o conteúdo desta tese está organizado conforme segue-se:

Capítulo 2 – Estado da arte sobre a temática da determinação das contribuições harmônicas

O Capítulo 2 reúne uma síntese do estado da arte atual sobre a temática da determinação das contribuições harmônicas, no contexto dos objetivos e das contribuições propostos neste trabalho. Ademais, esse capítulo contempla o detalhamento teórico dos métodos selecionados

para serem analisados, comparados e validados via simulações computacionais utilizando o *IEEE benchmark test system*.

Capítulo 3 – Avaliação computacional dos métodos para determinação das contribuições harmônicas no *IEEE benchmark test system*

O Capítulo 3 compreende a avaliação computacional dos métodos selecionados utilizando o sistema teste de referência para estudos sobre a determinação das contribuições harmônicas do IEEE. O intuito desta avaliação computacional é comparar os resultados dos métodos, além de, ao mesmo tempo, identificar as particularidades e limitações relacionadas à aplicação prática de cada um deles.

Capítulo 4 – Proposição de metodologia para definição do indicador de contribuição harmônica

Dando sequência, o Capítulo 4 apresenta a proposição de uma metodologia, na forma de um indicador, que visa determinar as contribuições harmônicas considerando a dinâmica de operação dos sistemas elétricos de potência, as particularidades dos métodos HCD vislumbrados para aplicação prática e as características da medição de distorções harmônicas em sistemas elétricos.

Capítulo 5 – Determinação do indicador de contribuição harmônica de agentes conectados a um PAC real: estudo de caso

O Capítulo 5 inclui a aplicação da metodologia proposta em um ponto de conexão de uma unidade consumidora com uma rede de distribuição. O objetivo do capítulo é apresentar um exemplo real de utilização e avaliação do indicador proposto com vistas ao estabelecimento da contribuição harmônica de agentes conectados ao sistema elétrico.

Capítulo 6 – Conclusões

O Capítulo 6 sintetiza os avanços realizados neste trabalho, bem como as conclusões alcançadas. Ainda, a partir das contribuições da tese, são elencadas sugestões de trabalhos futuros nessa área de pesquisa.

2 ESTADO DA ARTE SOBRE A TEMÁTICA DA DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES HARMÔNICAS

2.1 Considerações iniciais

O presente capítulo tem como propósito apresentar o estado da arte atual sobre a temática da determinação das contribuições harmônicas, bem como detalhar os métodos HCD selecionados, pela análise da literatura, como possíveis candidatos a comporem a metodologia para definição do indicador de contribuição harmônica.

2.2 Métodos para determinação das contribuições harmônicas

As mudanças na operação e na natureza das cargas e equipamentos do sistema elétrico ao longo dos anos, especialmente com o aumento exponencial do uso de equipamentos capazes de injetar harmônicos na rede, resultaram em uma elevação dos níveis de distorção harmônica e na ocorrência mais frequente de problemas relacionados [4], [15], [16], [17], [18], [19]. Sabendo, então, que as distorções harmônicas verificadas em um dado PAC são resultantes da interação entre as diversas fontes conectadas ao sistema, a discussão da temática da determinação das contribuições harmônicas, ou compartilhamento de responsabilidades harmônicas, tornou-se de extrema relevância para a área de qualidade da energia elétrica (QEE). Por isso, tem sido alvo de extensas investigações ao longo de mais de 20 anos, com o objetivo de, especialmente, estabelecer um ou mais métodos que sejam capazes de estimar de forma segura, confiável e prática as contribuições harmônicas dos diferentes agentes conectados em um sistema elétrico.

Os primeiros métodos propostos para esta finalidade foram o Método do Fluxo de Potência Harmônica [34], [35] e o Método da Corrente Conforme e Não Conforme [36], [37]. Entretanto, trabalhos publicados posteriormente demonstraram a existência de fragilidades nas suas formulações [38], [39], [40].

Ainda no início dos anos 2000, foi publicado o método mais reconhecido e difundido na literatura até os dias atuais. O Método da Superposição [41], [42], posteriormente nomeado como Método do Vetor Harmônico, se destaca pela sua fundamentação nos princípios básicos de solução de circuitos elétricos, justamente empregando a teoria da superposição, que vai ao

encontro da afirmação que as distorções harmônicas verificadas nos barramentos da rede resultam da combinação das emissões das fontes harmônicas existentes.

Apesar de ser amplamente difundido na literatura por proporcionar resultados muito bem fundamentados, consistentes e coerentes, este procedimento encontra fortes obstáculos para sua implementação prática. O principal motivo de sua limitação está na necessidade de se conhecer as impedâncias harmônicas dos agentes envolvidos, as quais não se encontram, na grande maioria dos casos, disponíveis. Além disso, a complexidade do comportamento de certos equipamentos não lineares e a dinâmica natural dos sistemas elétricos torna mais difícil estimar tais impedâncias [14], [31], [43], [44], [45], [46]. Então, apesar da simplicidade e coerência do método, o conhecimento das impedâncias harmônicas se torna um ponto complexo.

Visando atender os objetivos associados com o conhecimento das impedâncias harmônicas em sistemas elétricos, diversos procedimentos foram propostos na literatura para este fim [31], [33], [47], [48], [49], [50], [51], [52]. O princípio utilizado por estes processos é comum, em sua maioria. Basicamente, utilizam da variação nos valores de tensão e corrente nos arranjos elétricos para cálculo dos parâmetros requeridos. Ademais, é válido mencionar que costumava-se considerar o comportamento dos equipamentos não lineares como o de fontes de correntes ideais, para as ordens harmônicas. Entretanto é reconhecido na literatura que equipamentos não lineares podem não apresentar este comportamento ideal devido a diferentes fatores, sendo o modelo mais fiel composto por uma fonte de corrente em paralelo com uma impedância, para cada ordem harmônica de interesse [45], [46], [53]. Nesse sentido, em estudos computacionais, as metodologias propostas para calcular as impedâncias harmônicas são válidas, pois o ambiente controlado da simulação torna a estimação das impedâncias de equipamentos não lineares factível e mais precisa.

Voltando as atenções para a determinação das contribuições harmônicas, a expressiva quantidade de publicações sobre essa temática ao longo dos anos demonstra que pesquisadores de todo o mundo têm se dedicado ao estudo dessa questão. A título de informação, somente entre os anos de 2016 e 2022 foram publicados, em periódicos indexados, mais de 70 artigos relacionados ao tema, sem contar aqueles publicados em conferências, bem como teses e dissertações.

Dentre os inúmeros métodos e procedimentos propostos, alguns se limitam a indicar a fonte dominante ou principal, ou seja, não estabelecem quantitativos de contribuição, a exemplo do Método da Impedância Crítica [54] e o *Voltage-Current-Ratio-Difference* [55]. Outros já se dedicam a estimar de maneira quantitativa o impacto das fontes harmônicas nos sistemas

elétricos. Esse é o caso do procedimento definido na normativa IEC 61000-3-6 [24], que tem como objetivo estabelecer a emissão harmônica de consumidores.

De forma mais específica, a busca por meios para contornar as dificuldades envolvidas na aplicação prática do Método da Superposição culminou na proposição de outros métodos, como o Método da Impedância Dominante [56], que utiliza como princípio a conexão de um filtro harmônico passivo no PAC para determinar as fontes de corrente equivalentes, e métodos baseados na mudança de estado controlada, como o Método do Chaveamento de Capacitor [57], o Método da Injeção de Corrente Harmônica [58] e o Método do Filtro Ativo [59]. Estes métodos estabelecem duas condições operativas distintas, sendo, geralmente, uma correspondente à operação original e outra ocasionada por alterações controladas. Apesar de compartilharem do mesmo princípio, as estratégias adotadas em cada método diferem entre si.

Complementarmente, métodos para determinação das contribuições harmônicas baseados em técnicas de separação cega de fontes têm ganhado destaque. Neste contexto, muitos trabalhos têm explorado a análise de componentes independentes complexos (CICA) [60], [61], [62], [63], [64], [65]. Os métodos baseados na CICA visam determinar as impedâncias harmônicas de maneira estatística e, assim, possibilitar a aplicação do Método da Superposição. Esses métodos utilizam somente medições de tensão e corrente dos barramentos, entretanto, esbarram em desafios relacionados, principalmente, à dinâmica de operação dos sistemas elétricos, como a variação do *background harmonics* e das impedâncias harmônicas ao longo do período de análise.

Não obstante aos métodos supracitados, reconhece-se também a existência de procedimentos baseados em outros princípios, os quais incluem: métodos de regressão [66], [67], [68], inteligência artificial como redes neurais [69], teoria de potência conservativa [70], entre outros.

Por fim, poucos trabalhos apresentaram proposições de indicadores de contribuição harmônica de forma contínua, isto é, considerando a dinâmica de operação dos sistemas ao longo de determinados intervalos de tempo ou continuamente [71], [72]. Contudo, foram encontrados na literatura procedimentos propostos para estabelecer uma precificação sobre os harmônicos existentes nas redes (*harmonic pricing*), os quais se baseiam na definição das contribuições harmônicas para impor uma cobrança mais justa aos consumidores sobre a energia harmônica injetada por eles na rede [73], [74], [75], [76], [77], [78]. Esses processos podem ser comparados às penalizações sobre o fator de potência atualmente previstos em normativas.

2.3 Descrição dos métodos HCD selecionados para avaliação computacional

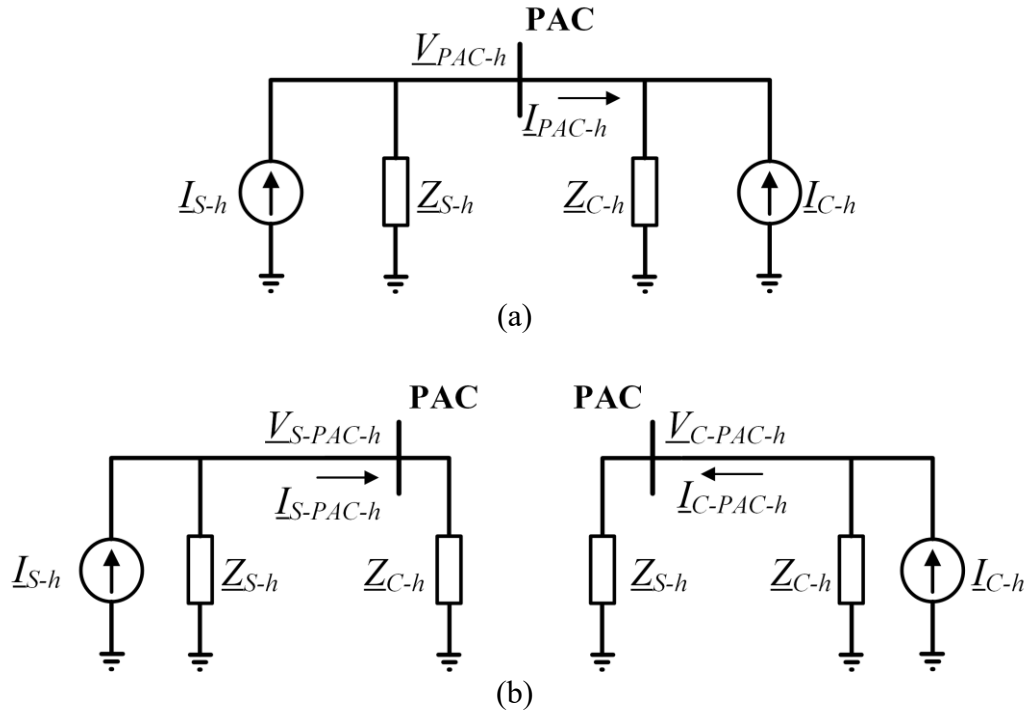
Esta seção objetiva detalhar as fundamentações teóricas de alguns métodos HCD selecionados, a partir de uma ampla análise da literatura, por oferecem atrativos voltados a não necessidade do conhecimento das impedâncias harmônicas e, portanto, por possuírem potencial de aplicação em campo. Os métodos selecionados foram o Método da IEC, da norma IEC 61000-3-6, o Método da Impedância Dominante, o Método do Chaveamento de Capacitor, o Método de Injeção de Corrente Harmônica, o Método do Filtro Ativo e o Método da Análise de Componentes Independentes Complexas. Além destes, o Método da Superposição também é detalhado por ser a referência para avaliação e comparação dos demais.

2.3.1 Método da Superposição ou Método do Vetor Harmônico (MVH)

O MVH [41], [42], considera a representação dos agentes conectados ao PAC como circuitos equivalentes de Thévenin ou de Norton. A Figura 2(a) apresenta o circuito equivalente de Norton do sistema da Figura 1, incluindo as distorções harmônicas originadas no sistema supridor e as distorções advindas do consumidor, as quais são representadas pelas fontes de corrente harmônicas (I_{S-h}) e (I_{C-h}) , nesta ordem. O circuito também inclui as respectivas impedâncias harmônicas (Z_{S-h}) e (Z_{C-h}) , e é sempre definido para cada ordem harmônica h de interesse, individualmente. Os parâmetros do circuito de Norton da Figura 2(a) representam, de forma simplificada, toda a topologia da rede e os diversos componentes que perfazem as instalações dos agentes conectados. Esta simplificação é uma representação muito difundida e utilizada em diversas normativas do setor elétrico.

Assim, ao aplicar o princípio da superposição, ilustrado na Figura 2(b), é possível separar as contribuições individuais das partes, neste caso, rede supridora $(V_{S-PAC-h})$ e consumidor $(V_{C-PAC-h})$, sobre a tensão harmônica medida no PAC (V_{PAC-h}) . Os fasores de contribuição de tensão são calculados a partir de (1) e (2).

Figura 2 – PAC conectando um consumidor a um sistema supridor: (a) circuito equivalente de Norton. (b) Aplicação do princípio da superposição.



Fonte: Autoria própria.

$$\underline{V}_{S-PAC-h} = \left(\frac{\underline{Z}_{S-h} \cdot \underline{Z}_{C-h}}{\underline{Z}_{S-h} + \underline{Z}_{C-h}} \right) \cdot \underline{I}_{S-h} \quad (1)$$

$$\underline{V}_{C-PAC-h} = \left(\frac{\underline{Z}_{S-h} \cdot \underline{Z}_{C-h}}{\underline{Z}_{S-h} + \underline{Z}_{C-h}} \right) \cdot \underline{I}_{C-h} \quad (2)$$

Onde,

$$\underline{I}_{S-h} = \frac{\underline{V}_{PAC-h}}{\underline{Z}_{S-h}} + \underline{I}_{PAC-h} \quad (3)$$

$$\underline{I}_{C-h} = \frac{\underline{V}_{PAC-h}}{\underline{Z}_{C-h}} - \underline{I}_{PAC-h} \quad (4)$$

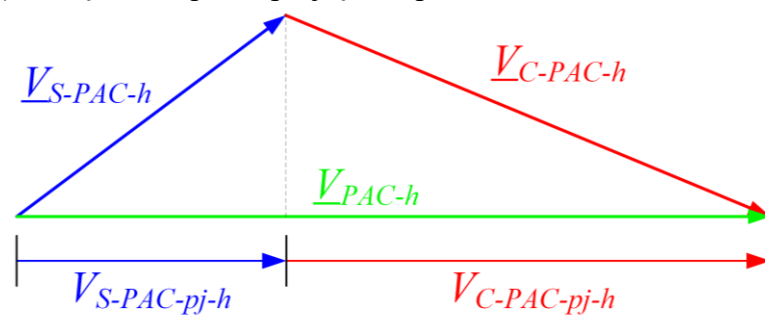
Pelo princípio da superposição, \underline{V}_{PAC-h} corresponde ao somatório dos fasores de contribuição do supridor e do consumidor, para cada ordem harmônica h , conforme (5).

$$\underline{V}_{PAC-h} = \underline{V}_{S-PAC-h} + \underline{V}_{C-PAC-h} \quad (5)$$

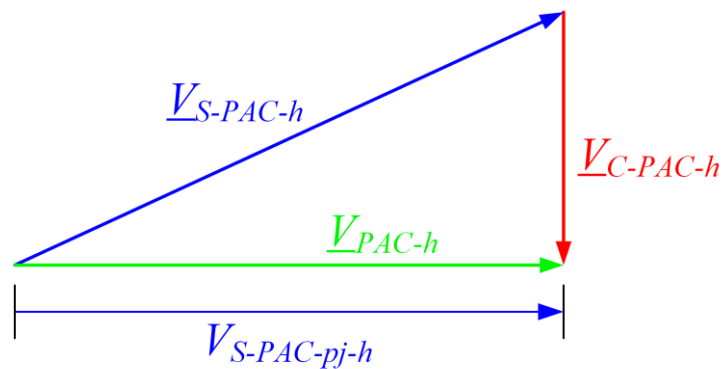
Portanto, os fasores de contribuição representam as quantidades que cada agente contribui para com a tensão harmônica total, de ordem h , do PAC. O método estabelece a

utilização das projeções desses fasores sobre a tensão do PAC como uma maneira de determinar as parcelas, isto é, os índices, de contribuição a partir de grandezas escalares. Assim, na Figura 3, além dos fasores de contribuição do sistema supridor e consumidor, também são mostradas suas respectivas projeções, $V_{S-PAC-pj-h}$ e $V_{C-PAC-pj-h}$, sobre \underline{V}_{PAC-h} .

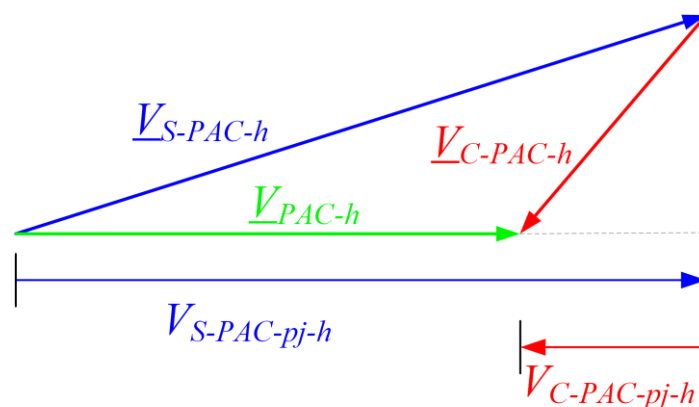
Figura 3 – Diagrama fasorial das contribuições de tensão e projeções na (a) situação em que as projeções possuem o mesmo sentido, na (b) situação em que uma das projeções é nula, e na (c) situação em que as projeções apresentam sentidos contrários.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que $|\underline{V}_{PAC-h}|$ corresponde à soma algébrica das projeções $V_{S-PAC-pj-h}$ e $V_{C-PAC-pj-h}$. Por isso, a depender da defasagem angular entre os fasores de contribuição e o fasor resultante, observa-se na Figura 3 que existem três possíveis situações:

- a) os fasores de contribuição individual apresentam um defasamento angular menor que 90° em relação ao fasor resultante, o que leva as projeções destes a serem positivas e possuírem o mesmo sentido;
- b) um dos fasores de contribuição individual apresenta um defasamento angular igual a 90° em relação ao fasor resultante, o que leva a sua projeção a ser nula;
- c) um dos fasores de contribuição individual apresenta um defasamento angular maior que 90° em relação ao fasor resultante, o que torna a sua projeção negativa e, portanto, leva as projeções a possuírem sentidos opostos.

O MVH sugere que os índices de contribuição das partes envolvidas podem ser apresentados em termos percentuais a partir das projeções de cada um dos fasores de contribuição sobre \underline{V}_{PAC-h} [79]. Todavia, como as projeções negativas culminam em percentuais de contribuição negativos, pois atuam no sentido de diminuir a tensão harmônica total no PAC, há trabalhos que estabelecem a utilização dos módulos das projeções no cálculo dos percentuais de contribuição, assim, a totalidade, 100%, passa a ser a soma absoluta das projeções ($|V_{S-PAC-pj-h}| + |V_{C-PAC-pj-h}|$) ao invés da soma algébrica que corresponde a $|\underline{V}_{PAC-h}|$ [32].

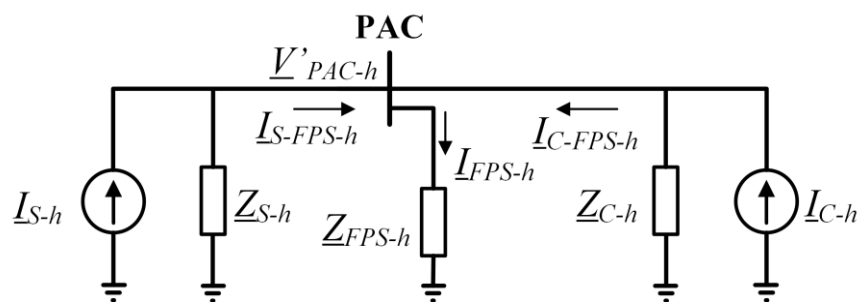
Ademais, apesar de, na maioria dos artigos publicados, os autores recomendarem a utilização das projeções para estabelecer os índices de contribuição no MVH [41], [42], [80], [81], [38], [79], o uso dos módulos (magnitudes) dos fasores de contribuição não é completamente excluído por eles [81]. Em [61], a justificativa para o uso dos módulos dos fasores se baseia na condição em que um dos fasores de contribuição possui 90° de defasagem em relação a \underline{V}_{PAC-h} (Figura 3(b)). Nesse caso, a projeção é nula e conseqüentemente o índice de contribuição é zero, no entanto, os autores destacam que o fasor de contribuição correspondente colabora com a variação da tensão harmônica do PAC. Inclusive, os módulos dos fasores de contribuição são utilizados em outro método que será apresentado na sequência.

2.3.2 Método da Impedância Dominante (MID)

O MID [56] afirma que os percentuais, ou as parcelas, de contribuição harmônica de tensão podem ser calculados se as fontes de corrente harmônica do supridor e do consumidor forem conhecidas (da Figura 2(a)), ou mesmo a proporcionalidades entre elas, pois de acordo com o MVH, $\underline{V}_{S-PAC-h}$ e $\underline{V}_{C-PAC-h}$ são diretamente proporcionais as correntes \underline{I}_{S-h} e \underline{I}_{C-h} , como visto em (1) e (2). Portanto, o método utiliza uma estratégia para encontrar essas fontes de correntes harmônicas sem conhecer as impedâncias da rede supridora e do consumidor.

A estratégia é conectar uma “impedância dominante” no PAC, um filtro passivo sintonizado (FPS) na ordem h , como visto na Figura 4. Normalmente, o filtro tem uma impedância (\underline{Z}_{FPS-h}) consideravelmente menor que \underline{Z}_{S-h} e \underline{Z}_{C-h} , na ordem h , tornando-se o caminho preferencial para o fluxo das correntes harmônicas e por isso é chamada de “dominante”.

Figura 4 – Circuito equivalente de Norton de um PAC conectando um consumidor a um sistema supridor com uma impedância dominante ON (filtro passivo).



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4, \underline{V}'_{PAC-h} é a tensão harmônica no PAC com o filtro ligado, \underline{I}_{FPS-h} representa a corrente do filtro, $\underline{I}_{S-FPS-h}$ e $\underline{I}_{C-FPS-h}$ são as correntes que fluem das instalações do supridor e do consumidor para o filtro. Se \underline{Z}_{FPS-h} for dominante sobre as outras impedâncias, as correntes harmônicas fluem majoritariamente para o filtro e as seguintes equações são válidas:

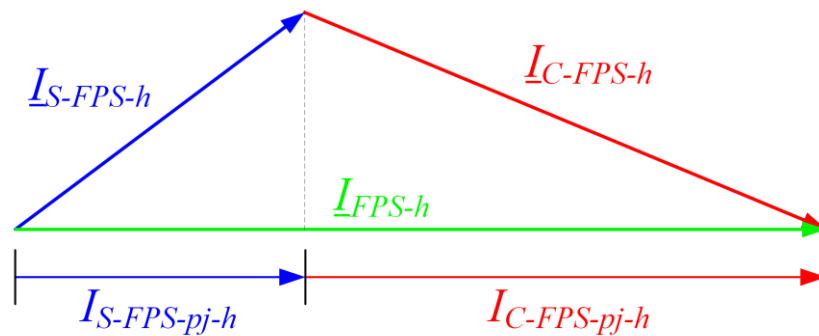
$$\underline{I}_{S-FPS-h} = \underline{I}_{S-h} \quad (6)$$

$$\underline{I}_{C-FPS-h} = \underline{I}_{C-h} \quad (7)$$

$$\underline{I}_{FPS-h} = \underline{I}_{S-FPS-h} + \underline{I}_{C-FPS-h} \quad (8)$$

Assim, é possível mensurar as correntes representativas das fontes harmônicas das partes envolvidas a partir de medições das correntes harmônicas no PAC à montante ($\underline{I}_{S-FPS-h}$) e à jusante ($\underline{I}_{C-FPS-h}$) da impedância dominante. O método segue um procedimento semelhante as projeções utilizadas no MVH, mas agora $\underline{I}_{S-FPS-h}$ e $\underline{I}_{C-FPS-h}$ são projetadas sobre a corrente total que flui pela impedância dominante, \underline{I}_{FPS-h} , conforme mostrado na Figura 5. Como estas correntes são proporcionais a $\underline{V}_{S-PAC-h}$ e $\underline{V}_{C-PAC-h}$, o conhecimento delas é suficiente para definir os respectivos percentuais de contribuição de tensão do sistema supridor e consumidor.

Figura 5 – Diagrama fasorial das correntes drenadas pelo FPS e projeções sobre a corrente total do FPS.



Fonte: Autoria própria.

Assim, percebe-se que para determinar os percentuais de contribuição de tensão, basta-se medir as correntes harmônicas no PAC à montante e à jusante da impedância dominante. Entretanto, caso seja desejado calcular os fasores de contribuição de tensão, também se torna indispensável medir a tensão no PAC com o FPS desligado, então pode-se calcular os fasores de contribuição pelas equações (9) e (10).

$$\underline{V}_{S-PAC-h} = \left(\frac{\underline{I}_{S-FPS-h}}{\underline{I}_{S-FPS-h} + \underline{I}_{C-FPS-h}} \right) \cdot \underline{V}_{PAC-h} \quad (9)$$

$$\underline{V}_{C-PAC-h} = \left(\frac{\underline{I}_{C-FPS-h}}{\underline{I}_{S-FPS-h} + \underline{I}_{C-FPS-h}} \right) \cdot \underline{V}_{PAC-h} \quad (10)$$

A partir dos desenvolvimentos matemáticos do MID, evidencia-se que o grau de dominância da impedância conectada ao PAC sobre as impedâncias harmônicas das partes

envolvidas influencia diretamente na efetividade do método. O grau de dominância do filtro é avaliado pelo índice de dominância (ID), *dominance index*, que é calculado a partir das tensões harmônicas medidas no PAC quando o filtro está desligado e quando está ligado, conforme mostrado em (11). Um ID superior a 0,8 é suficiente para garantir a dominância do FPS, e consequentemente alcançar resultados satisfatórios para o método [56].

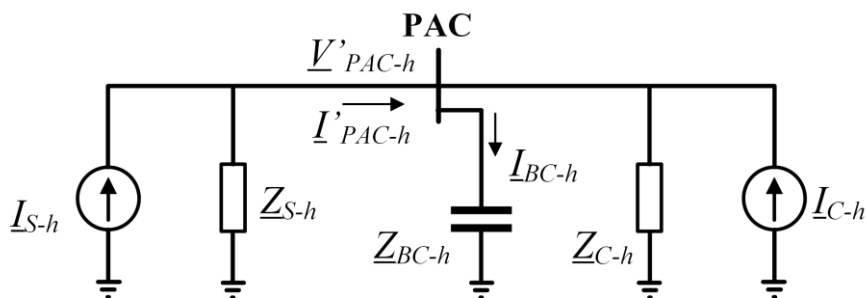
$$ID_h = \frac{V_{PAC-h}}{V_{PAC-h} + V'_{PAC-h}} \quad (11)$$

Além disso, os estudos desenvolvidos em [82] definiram a topologia do filtro passivo sintonizado em uma frequência como sendo a mais indicada para atingir o teor de dominância exigido. Aliás, esses estudos também constataram que filtros com maior potência, maior fator de qualidade e com ausência de dessintonia ocasionaram resultados mais exatos para a o MID. Portanto, a aplicação do MID torna-se facilitada em PACs que já possuem filtros passivos sintonizados instalados.

2.3.3 Método do Chaveamento de Capacitor (MCC)

O MCC [57] utiliza a estratégia de conectar um banco de capacitor (BC) no PAC e medir as tensões e correntes antes e depois de energizá-lo para determinar os percentuais de contribuição de tensão da rede supridora e do consumidor. A Figura 2(a) representa o sistema antes de se conectar o capacitor (estado operacional 1 – BC OFF), enquanto a Figura 6 ilustra o sistema após o banco de capacitores ser ligado, representado por Z_{BC-h} (estado operacional 2 – BC ON).

Figura 6 – Circuito equivalente de Norton de um PAC conectando um consumidor a um sistema supridor com um banco de capacitores ON.



Fonte: Autoria própria.

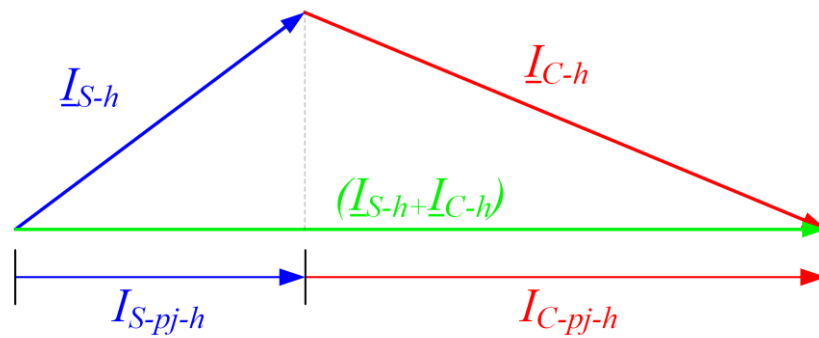
Na Figura 6, \underline{V}'_{PAC-h} e \underline{I}'_{PAC-h} são a tensão e corrente harmônica no PAC quando o banco de capacitores está ligado, enquanto \underline{I}_{BC-h} é a corrente que flui para o banco. Supondo que as impedâncias harmônicas, bem como as fontes de corrente harmônica, não mudam de um estado para outro, o MCC apresenta o equacionamento para calcular \underline{I}_{S-h} e \underline{I}_{C-h} :

$$\underline{I}_{S-h} = \frac{(I_{PAC-h} \cdot \underline{V}'_{PAC-h}) - (\underline{I}'_{PAC-h} \cdot \underline{V}_{PAC-h})}{(\underline{V}'_{PAC-h} - \underline{V}_{PAC-h})} \quad (12)$$

$$\underline{I}_{C-h} = \frac{(\underline{V}_{PAC-h} \cdot (\underline{I}'_{PAC-h} - \underline{I}_{BC-h})) - (\underline{V}'_{PAC-h} \cdot \underline{I}_{BC-h})}{(\underline{V}'_{PAC-h} - \underline{V}_{PAC-h})} \quad (13)$$

A partir do cálculo das fontes de correntes, o método sugere que sejam feitas as projeções dos fasores \underline{I}_{S-h} e \underline{I}_{C-h} sobre o fasor da soma total das correntes harmônicas oriundas do supridor e do consumidor ($\underline{I}_{S-h} + \underline{I}_{C-h}$), como apresentado na Figura 7. Estas projeções resultam em números escalares que são então utilizados para quantificar, em termos percentuais, as contribuições do supridor e do consumidor sobre a distorção total de tensão no PAC.

Figura 7 – Diagrama fasorial das fontes de corrente e projeções sobre $(\underline{I}_{S-h} + \underline{I}_{C-h})$.



Fonte: Autoria própria.

Entretanto, as equações do método podem ser modificadas para calcular diretamente os fasores de contribuição de tensão, conforme (14) e (15).

$$\underline{V}_{S-PAC-h} = \frac{\underline{V}_{PAC-h} \cdot ((I_{PAC-h} \cdot \underline{V}'_{PAC-h}) - (\underline{I}'_{PAC-h} \cdot \underline{V}_{PAC-h}))}{(I_{PAC-h} \cdot \underline{V}'_{PAC-h}) - (\underline{V}'_{PAC-h} \cdot \underline{I}_{BC-h}) - (\underline{V}_{PAC-h} \cdot \underline{I}_{BC-h})} \quad (14)$$

$$\underline{V}_{C-PAC-h} = \frac{\underline{V}_{PAC-h} \cdot \left((\underline{I}'_{PAC-h} \cdot \underline{V}_{PAC-h}) - (\underline{I}_{BC-h} \cdot \underline{V}_{PAC-h}) - (\underline{I}_{BC-h} \cdot \underline{V}'_{PAC-h}) \right)}{(\underline{I}_{PAC-h} \cdot \underline{V}'_{PAC-h}) - (\underline{V}'_{PAC-h} \cdot \underline{I}_{BC-h}) - (\underline{V}_{PAC-h} \cdot \underline{I}_{BC-h})} \quad (15)$$

Percebe-se que tanto os fasores de contribuição quanto as fontes de corrente podem ser determinados a partir de medições de tensões e correntes no PAC nas duas condições operativas estudadas. As equações do MCC, na sua forma original [57], requerem o conhecimento da impedância do banco de capacitores (Z_{BC-h}), contudo, nos equacionamentos apresentados neste trabalho, utiliza-se a medição da corrente que flui para o BC para calcular essa impedância no momento da aplicação do método, aumentando assim a precisão dos resultados.

Assim sendo, o MCC se apresenta como um método de mudança de estado controlada. Portanto, um dos pressupostos desse método é que, tanto as fontes de corrente, quanto as impedâncias harmônicas dos circuitos equivalente do supridor e do consumidor, não mudem suas características quando se aplica o processo em pauta. Por isso, o banco de capacitores deve possuir parâmetros suficientes para proporcionar variações dos valores de tensão e corrente medidos, porém, em proporções tais a não influenciar as condições de operação dos agentes conectados ao PAC. Inclusive, em [57], recomenda-se que o capacitor conectado seja capaz de modificar as tensões e correntes na ordem harmônica de interesse, mas que ao mesmo tempo não altere a tensão fundamental no PAC em mais de 5%.

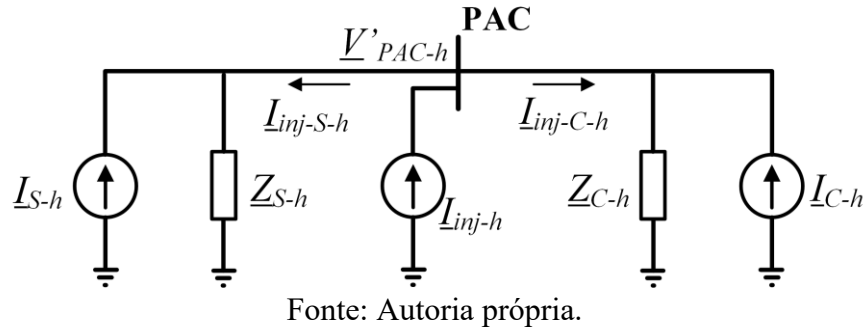
Um dos atrativos desta proposta está no fato que unidades capacitivas são frequentemente encontradas nas instalações elétricas, inclusive com a possibilidade de diferentes estágios de potência reativa.

2.3.4 Método da Injeção de Corrente Harmônica (MICH)

O MICH [58], por sua vez, realiza medições de tensões e correntes no PAC antes e durante a injeção de uma corrente harmônica para estimar as fontes de corrente do supridor e do consumidor e, conseqüentemente, os respectivos percentuais de contribuição de tensão. Um filtro ativo (FA) pode ser usado para injetar essas correntes ou, ainda, um dispositivo pode ser projetado para fazê-lo.

A Figura 2(a), mais uma vez, caracteriza o sistema antes da injeção da corrente harmônica (estado operacional 1 – injeção de corrente OFF). A Figura 8 considera a injeção de uma corrente (\underline{I}_{inj-h}) (estado operacional 2 – injeção de corrente harmônica ON), ou seja, este método também se caracteriza como um método de mudança de estado controlada.

Figura 8 – Circuito equivalente de Norton de um PAC conectando um consumidor a um sistema supridor considerando a injeção de uma corrente harmônica.



Na Figura 8, \underline{V}'_{PAC-h} e \underline{I}'_{PAC-h} são a tensão e corrente harmônica no PAC quando a corrente é injetada no sistema. $\underline{I}_{inj-S-h}$ e $\underline{I}_{inj-C-h}$ representam as correntes que fluem para as instalações do sistema supridor e do consumidor.

Supondo que as impedâncias harmônicas, bem como as fontes de corrente harmônica não se alteram de um estado para outro, o método estabelece o equacionamento para calcular as fontes de corrente equivalentes dos sistemas supridor e consumidor, já que, como anteriormente destacado, estas são proporcionais as contribuições de tensão e por isso são suficientes para encontrar os percentuais de contribuição.

$$\underline{I}_{S-h} = \frac{(\underline{I}_{inj-S-h} \cdot \underline{V}_{PAC-h}) + (\underline{I}_{PAC-h} \cdot \underline{V}'_{PAC-h})}{(\underline{V}'_{PAC-h} - \underline{V}_{PAC-h})} \quad (16)$$

$$\underline{I}_{C-h} = \frac{(\underline{I}_{inj-C-h} \cdot \underline{V}_{PAC-h}) - (\underline{I}_{PAC-h} \cdot \underline{V}'_{PAC-h})}{(\underline{V}'_{PAC-h} - \underline{V}_{PAC-h})} \quad (17)$$

Então, à semelhança do MCC, os percentuais de contribuição são avaliados pelas projeções de \underline{I}_{S-h} e \underline{I}_{C-h} sobre $(\underline{I}_{S-h} + \underline{I}_{C-h})$, como na Figura 7.

Mais uma vez, caso seja desejado calcular os fasores de contribuição de tensão diretamente, $\underline{V}_{S-PAC-h}$ e $\underline{V}_{C-PAC-h}$, as equações podem ser adaptadas de acordo com (18) e (19):

$$\underline{V}_{S-PAC-h} = \frac{(\underline{I}_{inj-S-h} \cdot \underline{V}_{PAC-h}) + (\underline{I}_{PAC-h} \cdot \underline{V}'_{PAC-h})}{(\underline{I}_{inj-S-h} + \underline{I}_{inj-C-h})} \quad (18)$$

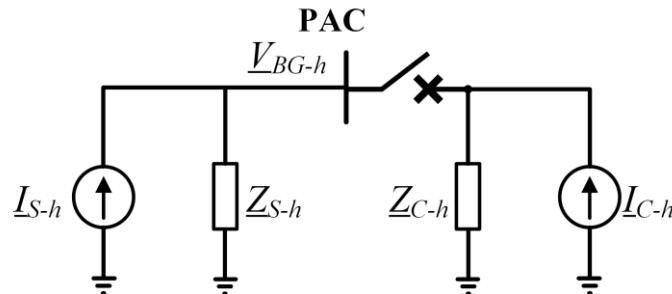
$$\underline{V}_{C-PAC-h} = \frac{(\underline{I}_{inj-C-h} \cdot \underline{V}_{PAC-h}) - (\underline{I}_{PAC-h} \cdot \underline{V}'_{PAC-h})}{(\underline{I}_{inj-S-h} + \underline{I}_{inj-C-h})} \quad (19)$$

O MICH sugere a injeção de pequenos valores de corrente, com vistas a minimizar os impactos na condição de operação do sistema. Em [58], foram considerados valores de injeção de corrente de no máximo 1% das correntes fundamentais originalmente presentes nos pontos de interesse e bons resultados foram alcançados nos estudos computacionais. Desta forma, basta que a corrente injetada ocasione uma perturbação mínima perceptível pelos aparelhos de medição na ordem harmônica h de interesse.

2.3.5 Método da IEC (MIEC)

O MIEC [24] estabelece que a contribuição do supridor é a tensão medida no PAC antes da conexão do consumidor (*background distortion*). Considerando o circuito da Figura 2(a), a Figura 9 ilustra esta situação.

Figura 9 – Circuito equivalente de Norton de um PAC conectando um consumidor a um sistema supridor quando o consumidor está desconectado.



Fonte: Autoria própria.

Assim, \underline{V}_{BG-h} corresponde ao fasor de contribuição de tensão do sistema supridor (20). Como \underline{V}_{PAC-h} é a soma das contribuições do supridor e do consumidor, o fasor de contribuição do consumidor pode ser calculado subtraindo \underline{V}_{BG-h} de \underline{V}_{PAC-h} , conforme mostrado em (21):

$$\underline{V}_{S-PAC-h} = \underline{V}_{BG-h} \quad (20)$$

$$\underline{V}_{C-PAC-h} = \underline{V}_{PAC-h} - \underline{V}_{BG-h} \quad (21)$$

Para as situações em que não seja possível realizar a desconexão do consumidor, a contribuição do sistema supridor e do consumidor também podem ser calculadas por (22) e (23), entretanto, é imperativo o conhecimento da impedância do supridor.

$$\underline{V}_{S-PAC-h} = \underline{Z}_{S-h} \cdot \underline{I}_{S-h} \quad (22)$$

$$\underline{V}_{C-PAC-h} = -\underline{Z}_{S-h} \cdot \underline{I}_{PAC-h} \quad (23)$$

Finalmente, as contribuições de tensão harmônica (ou emissões) do supridor e do consumidor são definidas como as magnitudes dos fasores de contribuição de tensão correspondentes, $|\underline{V}_{S-PAC-h}|$ e $|\underline{V}_{C-PAC-h}|$. Contudo, a contribuição do consumidor é calculada de acordo com (21) apenas se a condição expressa em (24) for atendida. Caso contrário, a contribuição do consumidor será nula.

$$|\underline{V}_{PAC-h}| > |\underline{V}_{S-PAC-h}| \quad (24)$$

Para facilitar a comparação dos resultados de todos os métodos avaliados neste trabalho, considera-se o cálculo das projeções dos fasores de contribuição de tensão sobre \underline{V}_{PAC-h} . Este procedimento corresponde ao Método da IEC Modificado (MIEC-M) [83]. Para o MIEC-M, a partir das projeções de $\underline{V}_{S-PAC-h}$ e $\underline{V}_{C-PAC-h}$, se a condição (25) é satisfeita, o consumidor está contribuindo para a distorção do PAC e a medida da contribuição é dada por (26).

$$|\underline{V}_{PAC-h}| > |\underline{V}_{S-PAC-pj-h}| \quad (25)$$

$$|\underline{V}_{PAC-h}| - |\underline{V}_{S-PAC-pj-h}| \quad (26)$$

Agora, quando a condição (25) não é satisfeita, significa que o consumidor estaria compensando a distorção total do PAC e, por isso, o MIEC-M atribui uma emissão nula a ele.

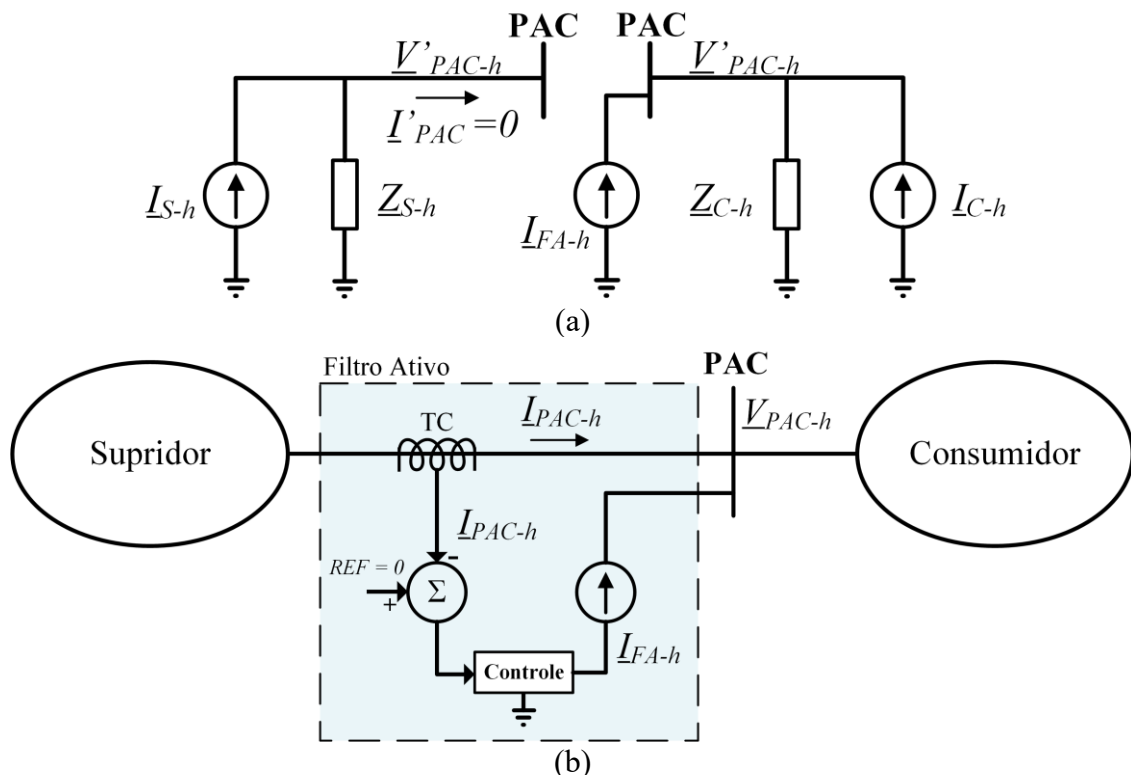
2.3.6 Método do Filtro Ativo (MFA)

O MFA [59], [84], [85] baseia-se no estabelecimento de um “isolamento harmônico” entre dois sistemas elétricos para obter as contribuições de tensão cabidas às partes envolvidas.

Considerando o circuito equivalente de Norton mostrado na Figura 2(a), o isolamento harmônico entre dois sistemas se caracteriza quando a corrente entre eles, para uma dada ordem harmônica h , é igual a zero ($I_{PAC-h} = 0$). Isto significa que existe um isolamento elétrico dos sistemas, o qual equivale a uma desconexão física para a ordem harmônica h . O método se fundamenta na hipótese que após o isolamento os valores das fontes e impedâncias harmônicas de ambos os sistemas não se alteram, permanecendo com seus valores originais.

Portanto, o MFA considera o estabelecimento de duas condições operativas distintas, sendo o estado operacional 1 representado pelos sistemas acoplados (Figura 2(a)), e o estado operacional 2, que considera os sistemas eletricamente desacoplados, devido ao isolamento harmônico (Figura 10(a)).

Figura 10 – (a) Circuito equivalente de Norton de um PAC conectando um consumidor a um sistema supridor evidenciando o isolamento harmônico devido à injeção de corrente harmônica pelo filtro ativo. (b) Representação de um filtro ativo conectado ao PAC, entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica h .



Fonte: Adaptado de [59].

Neste tocante, propõe-se que o isolamento harmônico seja atingido por meio da utilização de um filtro ativo (FA). A conexão de um filtro ativo no PAC é mostrada na Figura 10(b). A partir da malha fechada que inclui um transformador de corrente (TC), um somador (Σ), um sistema de controle e um dispositivo de eletrônica de potência que funciona como uma

fonte de corrente (\underline{I}_{FA-h}), é possível eliminar as correntes harmônicas medidas pelo TC, neste caso, \underline{I}_{PAC-h} . Assim, considera-se a atuação do filtro ativo como uma fonte de corrente ideal com capacidade de realizar o isolamento elétrico entre os sistemas do supridor e consumidor.

Na Figura 10(a), \underline{V}'_{PAC-h} é a tensão harmônica no PAC quando o FA injeta uma corrente (\underline{I}_{FA-h}) suficiente para zerar a corrente do PAC (\underline{I}'_{PAC-h}). Assim, considerando que as fontes de correntes e as impedâncias harmônicas dos sistemas supridor e consumidor não se alteram devido ao desacoplamento dos sistemas, é possível relacionar estes estados operativos, a partir da aplicação do princípio da superposição e, assim, determinar os fasores de contribuição de tensão harmônica do supridor e do consumidor:

$$\underline{V}_{S-PAC-h} = \frac{\underline{V}'_{PAC-h} \cdot \underline{I}_{PAC-h}}{\underline{I}_{FA-h}} \quad (27)$$

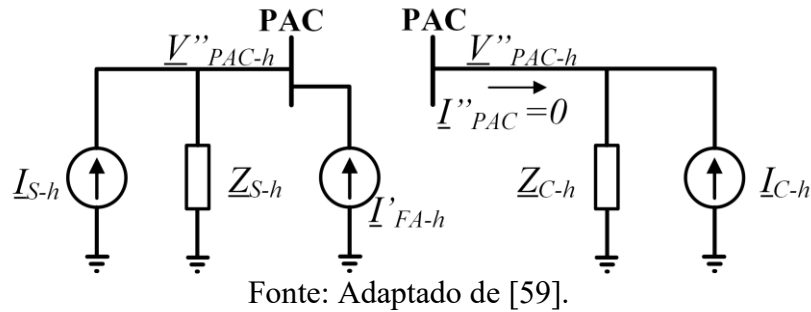
$$\underline{V}_{C-PAC-h} = \underline{V}_{PAC-h} - \left(\frac{\underline{V}'_{PAC-h} \cdot \underline{I}_{PAC-h}}{\underline{I}_{FA-h}} \right) \quad (28)$$

O método considera que os índices de contribuição sobre as distorções harmônicas de tensão do supridor e consumidor são os valores das projeções dos componentes fasoriais $\underline{V}_{S-PAC-h}$ e $\underline{V}_{C-PAC-h}$ sobre o fasor resultante \underline{V}_{PAC-h} , como mostrado anteriormente na Figura 3.

Em resumo, é válido reforçar que este procedimento se fundamenta em duas hipóteses para que alcance resultados satisfatórios. A primeira compreende o estabelecimento do isolamento harmônico dos sistemas envolvidos. A segunda hipótese abrange a invariabilidade do ponto de operação harmônico, isso significa que as fontes equivalentes de corrente (\underline{I}_{S-h} e \underline{I}_{C-h}), bem como as impedâncias harmônicas (\underline{Z}_{S-h} e \underline{Z}_{C-h}) permanecem constantes nos dois estados operativos (com e sem a injeção de corrente pelo FA).

Segundo os autores, uma maneira de verificar experimentalmente se as hipóteses adotadas para a validade da aplicação do método foram atendidas, é aplicar o MFA duas vezes, a primeira considerando a posição do TC do lado do sistema supridor (Figura 10(b)), e posteriormente alternando a posição do TC para o lado do sistema consumidor. Ou seja, considerando os circuitos equivalentes, o FA estaria do lado do sistema supridor, conforme apresentado na Figura 11. É evidente que se pressupõe a invariabilidade do ponto de operação harmônico durante as duas aplicações.

Figura 11 – Circuito equivalente de Norton de um PAC conectando um consumidor a um sistema supridor evidenciando o isolamento harmônico devido à injeção de corrente harmônica pelo filtro ativo – FA do lado do sistema supridor.



A partir da Figura 11 e da Figura 2(a), obtém-se outra equação para calcular $\underline{V}_{C-PAC-h}$:

$$\underline{V}_{C-PAC-h} = -\frac{\underline{V}_{PAC-h}'' \cdot \underline{I}_{PAC-h}}{\underline{I}'_{FA-h}} \quad (29)$$

Sabendo que \underline{V}_{PAC-h} é o somatório dos fasores de contribuição de tensão, este pode ser calculado pelo somatório de (27) e (29):

$$\underline{V}_{PAC-h}(calc) = \underline{I}_{PAC-h} \cdot \left(\frac{\underline{V}'_{PAC-h}}{\underline{I}'_{FA-h}} - \frac{\underline{V}''_{PAC-h}}{\underline{I}'_{FA-h}} \right) \quad (30)$$

O valor de $\underline{V}_{PAC-h}(calc)$ deve ser então comparado com \underline{V}_{PAC-h} medido quando os sistemas estão acoplados pela equação (31). Então, se ΔV_{PAC-h} for muito pequeno, significa que os fasores de contribuição das tensões, $\underline{V}_{S-PAC-h}$ e $\underline{V}_{C-PAC-h}$, obtidos pelo método, são precisos e que as hipóteses adotadas foram satisfeitas, validando a aplicação do MFA.

$$\Delta V_{PAC-h} = \left| \frac{\underline{V}_{PAC-h} - \underline{V}_{PAC-h}(calc)}{\underline{V}_{PAC-h}} \right| \cdot 100\% \quad (31)$$

Percebe-se que o MFA não exige o conhecimento das impedâncias harmônicas das partes envolvidas, basta o estabelecimento das duas condições operativas mencionadas e medições dos valores de tensão e correntes nas duas condições de operação: com e sem o isolamento harmônico. Além disso, a distinção deste processo em relação ao MICH está no fato que o MFA requer o cancelamento total da corrente do PAC da ordem harmônica de interesse, enquanto o MICH solicita apenas uma variação no valor da corrente harmônica do PAC.

2.3.7 Método da Análise de Componentes Independentes Complexas (MCICA)

A análise de componentes independentes complexas, do inglês *complex independent component analysis* (CICA), é uma técnica estatística de processamento de sinais utilizada para recuperar os sinais de fontes independentes, a partir de sinais medidos. Esta aplicação é usada quando não se conhece a maneira como os sinais das fontes independentes foram misturados [86], ou seja, é uma técnica de separação cega de fontes, do inglês *blind source separation* (BSS). O modelo matemático para solução de problemas utilizando a técnica CICA é:

$$X(t) = A.S(t) \quad (32)$$

Sendo t o tempo discreto ($t = 1, 2, \dots, k$), $S(t) = [S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)]^T$ corresponde à matriz dos sinais das fontes, de dimensão $n \times k$, e chamado também de componentes independentes; $X(t) = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_m(t)]^T$ é a matriz com os sinais medidos, de dimensão $m \times k$; e A é a matriz de mistura dos sinais, de ordem $m \times n$.

Nesse sentido, a ideia da técnica CICA está em estimar a matriz de mistura (A) tendo como parâmetros conhecidos apenas os sinais medidos (X), para, então, ser possível recuperar os sinais das fontes independentes (S) de forma estimada. Contudo, essa técnica estatística considera três premissas principais que devem ser atendidas para sua correta aplicação [87]:

- os sinais das fontes devem ser estatisticamente independentes;
- no máximo um dos sinais das fontes da matriz S pode ter distribuição gaussiana;
- o número de sinais das fontes, n , deve ser menor ou igual ao número de sinais medidos, m .

Assim, conhecendo a matriz dos sinais medidos e aplicando a técnica CICA, determina-se uma matriz de separação, W^H , que corresponde a uma estimativa da inversa da matriz A , o que possibilita recuperar os sinais das fontes utilizando (33):

$$\hat{S} = W^H.X \quad (33)$$

Onde: \hat{S} corresponde à matriz dos sinais das fontes estimados, e W^H é a matriz de separação. O índice H especifica que a matriz W é Hermitiana, isso significa que W é uma matriz quadrada complexa que é igual à sua própria transposta conjugada.

A técnica CICA se baseia em propriedades estatísticas para determinação da matriz W^H , buscando soluções por meio da maximização da independência e da não-gaussianidade dos sinais das fontes. Para atingir esse objetivo, diferentes algoritmos podem ser utilizados, entretanto, antes de aplicar o algoritmo é necessário realizar um pré-processamento dos dados dos sinais medidos para simplificação e otimização do problema. Esse pré-processamento é dividido em duas etapas: centralização e branqueamento [86]. Com a matriz dos sinais medidos centralizados e branqueados, então pode-se aplicar o algoritmo CICA para estimar a matriz W^H . Por fim, estima-se os sinais das fontes independentes utilizando (34).

$$\hat{S} = (W^H \cdot Q) \cdot X = U \cdot X \quad (34)$$

Sendo $U = W^H \cdot Q$, onde Q a matriz de branqueamento utilizada na etapa de pré-processamento [86].

Conhecendo os conceitos relacionados à técnica CICA, [60] define um método para determinar as impedâncias harmônicas do supridor e do consumidor chamado de *Complex Independent Component Analysis Method* (MCICA). O MCICA utiliza o algoritmo FastICA para maximizar a não-gaussianidade dos sinais das fontes por meio da aplicação da teoria de iteração do ponto-fixo, usando como função objetivo uma aproximação da negentropia [88].

Se as impedâncias harmônicas são, então, conhecidas, basta utilizar os sinais de tensão e corrente harmônicos medidos no PAC para calcular as parcelas de contribuição dos agentes pelo MVH. Retomando o MVH, a partir do circuito equivalente de Norton da Figura 2(a), a tensão e a corrente harmônicas do PAC podem ser calculadas a partir de (35):

$$\begin{bmatrix} V_{PAC-h} \\ I_{PAC-h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{Z_{S-h} \cdot Z_{C-h}}{Z_{S-h} + Z_{C-h}} \right) & \left(\frac{Z_{S-h} \cdot Z_{C-h}}{Z_{S-h} + Z_{C-h}} \right) \\ \left(\frac{Z_{S-h}}{Z_{S-h} + Z_{C-h}} \right) & - \left(\frac{Z_{C-h}}{Z_{S-h} + Z_{C-h}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S-h} \\ I_{C-h} \end{bmatrix} \quad (35)$$

ou, de maneira simplificada: $M = ZI$

Percebe-se que o modelo matemático da CICA (33) pode ser relacionado com as equações do MVH (35):

- os sinais de tensão e corrente medidos no PAC (M) correspondem aos sinais medidos (X);
- a matriz de impedâncias (Z) corresponde à matriz de mistura (A); e

- as fontes harmônicas de corrente dos sistemas supridor e consumidor (I) correspondem aos sinais das fontes independentes (S).

Antes de aplicar a CICA, é necessário verificar se as premissas da técnica são atendidas. Nesse contexto, nota-se que o número de sinais das fontes é igual ao número de sinais medidos, portanto essa premissa está adequada. Todavia, a condição dos sinais das fontes (\underline{I}_{S-h} e \underline{I}_{C-h}) serem estatisticamente independentes com distribuições de probabilidade não-gaussianas não é atendida, pois alguns fatores, tais como as condições climáticas, hora do dia, dia da semana, estação do ano, fazem com que exista uma correlação entre as correntes das cargas harmônicas de um sistema elétrico. Para contornar essa situação, os autores sugerem utilizar como dado de entrada para aplicação do MCICA as componentes de variação rápida dos sinais medidos, para tanto, aplica-se um filtro de média móvel na matriz M . Essa abordagem possibilita a aplicação da técnica CICA, pois conforme apresentado em [90], as componentes de variação rápida das correntes das cargas harmônicas ($\underline{I}_{S-h-fast}$ e $\underline{I}_{C-h-fast}$) possuem distribuição não-gaussiana e são estatisticamente independentes. Assim, (39) torna-se (36):

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{PAC-h-fast} \\ \underline{I}_{PAC-h-fast} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\underline{Z}_{S-h} \cdot \underline{Z}_{C-h}}{\underline{Z}_{S-h} + \underline{Z}_{C-h}} \right) & \left(\frac{\underline{Z}_{S-h} \cdot \underline{Z}_{C-h}}{\underline{Z}_{S-h} + \underline{Z}_{C-h}} \right) \\ \left(\frac{\underline{Z}_{S-h}}{\underline{Z}_{S-h} + \underline{Z}_{C-h}} \right) & - \left(\frac{\underline{Z}_{C-h}}{\underline{Z}_{S-h} + \underline{Z}_{C-h}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{S-h-fast} \\ \underline{I}_{C-h-fast} \end{bmatrix} \quad (36)$$

ou, de maneira simplificada:

$$\underline{M}_{fast} = \underline{Z} \cdot \underline{I}_{fast}$$

Portanto, a partir das componentes de variação rápida dos sinais de tensão e corrente medidos no PAC (\underline{M}_{fast}) e da técnica CICA, pode-se calcular a matriz \underline{U} , que corresponde à matriz de separação multiplicada pela matriz de branqueamento ($\underline{U} = \underline{W}^H \cdot \underline{Q}$).

Em seguida, o MCICA utiliza os elementos matriz \underline{U} , de dimensão 2x2, na determinação de duas impedâncias harmônicas:

$$\underline{Z}_1 = \frac{u_{12}}{u_{11}} \quad (37)$$

$$\underline{Z}_2 = -\frac{u_{22}}{u_{21}} \quad (38)$$

Onde u_{ij} é o elemento da linha i e coluna j da matriz U .

Para determinar quais dessas impedâncias (\underline{Z}_1 e \underline{Z}_2) são relativas ao supridor e ao consumidor, assume-se que a parte real da impedância (resistência) do sistema supridor é sempre positiva.

- Assim, se $\Re(\underline{Z}_1) > 0$, então $\begin{cases} \underline{Z}_{s-h} = \underline{Z}_1 \\ \underline{Z}_{c-h} = \underline{Z}_2 \end{cases}$
- No entanto, se $\Re(\underline{Z}_1) \leq 0$, então $\begin{cases} \underline{Z}_{s-h} = -\underline{Z}_2 \\ \underline{Z}_{c-h} = -\underline{Z}_1 \end{cases}$

Assim sendo, ao determinar as impedâncias do supridor e do consumidor, as respectivas contribuições de tensão podem, então, ser calculadas pela aplicação do MVH, já que a tensão e corrente medidas no PAC são conhecidas durante o período de avaliação do MCICA.

Percebe-se que, em termos práticos, esse método requer apenas a medição das tensões e correntes no PAC durante um período apropriado. Por exemplo, a medição durante 1 hora com período de integralização de 1 segundo resultaria em 3600 medições de tensão e corrente ao longo do tempo.

Uma questão importante com relação à aplicação desse método diz respeito à variação dos valores das impedâncias dos sistemas supridor e consumidor ao longo do período de análise, já que o método assume que durante o período de medição considerado as impedâncias dos agentes são mantidas constantes. Portanto, na ocorrência de variações desses parâmetros, o método em questão pode ocasionar erros na estimação das impedâncias [60].

2.4 Considerações finais

Como as normativas brasileiras [22], [89], bem como a maioria da regulação internacional, se restringem em limitar os níveis de distorção de tensão nos barramentos de conexão, os métodos selecionados contemplaram a estimação das contribuições de tensão. Todavia, excetuando-se o Método da IEC, todos os demais métodos poderiam ser adaptados para determinar as contribuições de corrente e abranger normativas que limitam esta grandeza, como é o caso de [25].

De maneira geral, o levantamento do estado da arte atual da temática da determinação das contribuições harmônicas possibilitou identificar alguns métodos HCD como possíveis candidatos a comporem a metodologia para definição do indicador de contribuição harmônica.

De maneira a fazer um comparativo dos métodos HCD selecionados, a Tabela 1 sintetiza os principais requisitos para suas aplicações práticas.

Tabela 1 – Comparação de requisitos de aplicação prática dos métodos HCD selecionados.

Métodos ↓	Equipamentos auxiliares	Condições de operação	Medição de tensão harmônica	Medição de corrente harmônica	Ordens harmônicas avaliadas
MID	FPS	FPS OFF/FPS ON	no PAC	no PAC e no FPS	ordem de sintonia do FPS
MCC	BC	BC OFF/BC ON	no PAC	no PAC e no BC	todas as ordens
MFA	FA	FA OFF/FA ON	no PAC	no PAC e no FA	ordens das correntes injetadas
MICH	equip. p/ injeção de corrente harmônica (FA)	FA OFF/FA ON	no PAC	no PAC e no FA	ordens das correntes injetadas
MIEC	Não requer	Consumidor ON/OFF	no PAC	Não requer	ordens existentes no PAC
MCICA	Não requer	Condições naturais do sistema	no PAC*	no PAC*	ordens existentes no PAC

* Necessita de uma determinada quantidade de medições (amostras) obtidas ao longo do tempo.

Fonte: Autoria própria.

Ainda, os métodos HCD vislumbrados para aplicação prática que utilizam equipamentos auxiliares, aqueles de mudança de estado – MID, MCC, MFA e MICH – consideram que a conexão do equipamento não deve influenciar as impedâncias harmônicas e as fontes de corrente dos agentes, por isso os requisitos específicos de cada um destes métodos devem ser atendidos para não impactar nas condições operacionais do sistema. O MIEC, por outro lado, requer a desconexão do consumidor, o que precisa ser avaliado quando da aplicação do método. Com relação ao MCICA, como ele computa o cálculo das impedâncias harmônicas utilizando uma quantidade de amostras das tensões e correntes medidas, espera-se que, durante o intervalo de tempo avaliado, as impedâncias harmônicas dos sistemas equivalentes se mantenham constantes.

Estes métodos HCD serão analisados e comparados de maneira mais aprofundada a partir da realização de estudos de caso computacionais, apresentados no capítulo seguinte.

3 AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES HARMÔNICAS NO *IEEE BENCHMARK TEST SYSTEM*

3.1 Considerações iniciais

O objetivo central deste capítulo é proporcionar um meio de analisar e comparar, de modo imparcial e sistematizado, os métodos HCD que apresentam potencial de comporem o indicador de contribuição harmônica a ser proposto. Para tanto, é utilizado um sistema computacional desenvolvido para este fim específico. Assim, torna-se possível verificar quais dos métodos selecionados proporcionam resultados coerentes com as expectativas, bem como identificar as particularidades e limitações relacionadas a cada método HCD quanto às suas aplicações em sistemas elétricos de potência reais.

3.2 Sistema teste de referência para estudos sobre a determinação das contribuições harmônicas do IEEE

O estabelecimento de sistemas teste de referência, do inglês *Benchmark Test System* (BTS), é de suma importância para o desenvolvimento científico em geral, pois BTSs são ferramentas que permitem definir situações e/ou condições padrão para análise e avaliação de diferentes métodos, técnicas ou procedimentos. A utilização de sistemas de referência também é de extrema valia nas pesquisas e estudos de sistemas elétricos de potência. Assim, ao longo dos anos foram estabelecidos vários BTSs para estudos das mais variadas temáticas relacionadas aos sistemas elétricos, tais como: os arranjos para estudos de fluxo de potência desenvolvidos pelo IEEE [90], [91], também aqueles propostos pelo CIGRE para estudos sobre transmissão em corrente contínua [92] e para estudos a respeito da integração de recursos energéticos renováveis e distribuídos [93].

Mais recentemente, no contexto da temática da determinação das contribuições harmônicas dos vários agentes conectados aos sistemas elétricos de potência, a *Task Force on Harmonics Modeling and Simulation* da *IEEE Power and Energy Society (IEEE-PES)* foi responsável pelo desenvolvimento um sistema elétrico de referência para aplicação e análise de métodos e procedimentos que visam a determinação de tais contribuições, possibilitando a avaliação e comparação por meio de simulações computacionais padronizadas. Este sistema

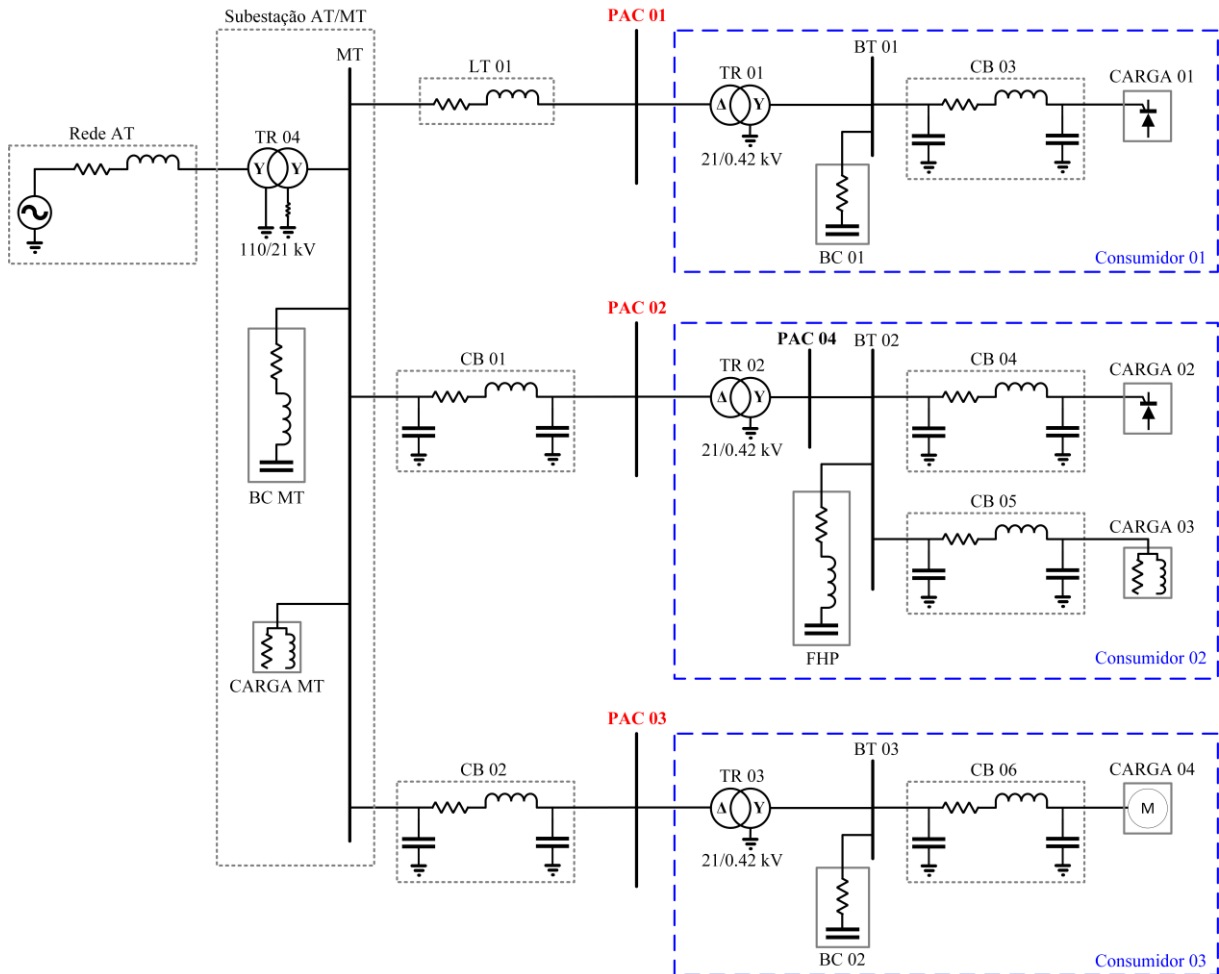
teste foi apresentado à comunidade científica em 2018 em [33] e chamado de *IEEE Benchmark Test System for Harmonic Contribution Determination Studies* (IEEE-BTS-HCD), ou, em português: sistema teste de referência para estudos sobre a determinação das contribuições harmônicas do IEEE.

A partir do levantamento bibliográfico realizado até março de 2024, observou-se que 21 publicações – entre artigos em conferências e periódicos, teses e dissertações – já utilizaram esse sistema elétrico, na sua forma original ou com modificações, para a realização de simulações e investigações a respeito da temática da detecção de fontes harmônicas e determinação das contribuições, a saber: [32], [59], [83], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111].

Uma das premissas adotadas para o estabelecimento deste modelo computacional foi a de ser o mais realístico possível. Portanto, a simulação ora implementada é trifásica e realizada no domínio do tempo; e as fontes de distorção harmônica também são modeladas no domínio do tempo a partir de seus próprios arranjos e componentes, e não por fontes equivalentes de tensão ou corrente, como tinha sido proposto inicialmente em [112]. O diagrama unifilar do IEEE-BTS-HCD está mostrado na Figura 12.

O IEEE-BTS-HCD representa uma típica rede elétrica com distintos níveis de tensão: alta tensão (AT), média tensão (MT) e baixa tensão (BT), suprindo três consumidores industriais que possuem seus respectivos PACs em MT. Os consumidores são compostos por cargas lineares (resistivas-indutivas e motores), cargas não lineares (retificadores), bancos de capacitores e filtros harmônicos passivos. Além dos consumidores, encontram-se também conectados na subestação um banco de capacitores e uma carga trifásica resistiva-indutiva, pertencentes à rede da concessionária. Todos os componentes do sistema são trifásicos e equilibrados e a frequência nominal do sistema é 50 Hz.

Figura 12 – Sistema teste de referência para estudos sobre a determinação das contribuições harmônicas do IEEE (IEEE-BTS-HCD).



Fonte: Adaptado de [33].

O sistema teste pode ser operado em 3 diferentes condições, as quais são chamadas de A, B e C. As condições A e B são muito similares, com modificações somente nos parâmetros do Consumidor 03. Ademais, nestas condições, os equipamentos do Consumidor 02 estão desligados, portanto somente o Consumidor 01 possui cargas não lineares. Na Condição C, todos os equipamentos estão conectados, assim, existem fontes harmônicas presentes nos Consumidores 01 e 02. É válido mencionar que a Condição B é especial pois os parâmetros do Consumidor 03 foram configurados para causar uma ressonância próxima à 11ª ordem. É essencial avaliar métodos HCD em condições críticas de operação, como é o caso da existência de ressonâncias.

A Tabela 2 apresenta uma visão geral das condições de funcionamento dos principais equipamentos nas três condições operativas. Mais detalhes a respeito dos parâmetros de cada componente do sistema estão disponíveis em [33] e são pormenorizadas em [98], que realizou a implementação desse sistema teste no MATLAB/Simulink.

Tabela 2 – Visão geral das três condições de operação do IEEE-BTS-HCD.

Elementos do Sistema	Condição A	Condição B	Condição C
Consumidor 01			
Retificador a tiristor (CARGA 01)	ligado	ligado	ligado
Banco de capacitores (BC 01)	ligado	ligado	ligado
Consumidor 02			
Retificador a tiristor (CARGA 02)	desligado	desligado	ligado
Carga linear (CARGA 03)	desligada	desligada	ligada
Filtro harmônico passivo (FHP)	desligado	desligado	ligado
Consumidor 03			
Motor de indução (CARGA 04)	Potência reduzida (200 kW, fp 0,9)	Potência máxima (600 kW, fp 0,9)	Potência reduzida (200 kW, fp 0,9)
Banco de capacitores (BC 02)	ligado (50 kVAr)	ligado (150 kVAr)	ligado (50 kVAr)
Carga MT			
(CARGA MT)	ligada	ligada	ligada
Banco de capacitores MT			
(BC MT)	desligado	desligado	ligado

Fonte: Autoria própria.

A implementação do sistema no MATLAB/Simulink, realizada em [98], contemplou somente a Condição C. Por isso, neste trabalho, a implementação foi aprimorada com o intuito de considerar as três condições de operação (A, B e C) e ainda permitir a inclusão de distorções pré-existentes (*background distortions* - BG) na Rede AT, contemplando as condições A-BG, B-BG e C-BG. Isto resultou em um total de 6 diferentes condições de operação. A ordem, magnitude (RMS fase-fase) e ângulo de fase das distorções pré-existentes incluídas na Rede AT foram adaptados de outro estudo envolvendo o IEEE-BTS-HCD [97] e são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Distorções pré-existentes incluídas na Rede AT.

5ª ordem	7ª ordem	11ª ordem	13ª ordem
224,5 V $\angle 80^\circ$	188,6 V $\angle -5^\circ$	224,5 V $\angle -30^\circ$	188,6 V $\angle -140^\circ$

Fonte: Autoria própria.

As ordens harmônicas escolhidas para as BGs estão diretamente relacionadas com aquelas existentes no sistema nas condições originais (A, B e C). Como as cargas não lineares dos consumidores são retificadores trifásicos de seis pulsos, sabe-se que, em condições equilibradas, esses equipamentos possuem um perfil típico de emissão de correntes harmônicas nas ordens $6k \pm 1$, sendo k um número inteiro [14].

O sistema completo implementado no *Simulink* é mostrado na Figura 13. As simulações do IEEE-BTS-HCD são realizadas por meio da execução de um conjunto de instruções em códigos (*scripts*) desenvolvido no ambiente de programação do MATLAB. Esses *scripts* permitem ao usuário escolher a condição de operação que ele deseja simular, de maneira que os parâmetros de cada componente do sistema correspondentes àquela condição escolhida sejam automaticamente importados para o modelo do *Simulink* e em sequência a simulação seja executada. Ao final da simulação, o *script* processa os dados das “medições” de tensão e corrente (fundamental e harmônicas) dos PACs e exporta os resultados para arquivos, para serem posteriormente utilizados pelo usuário.

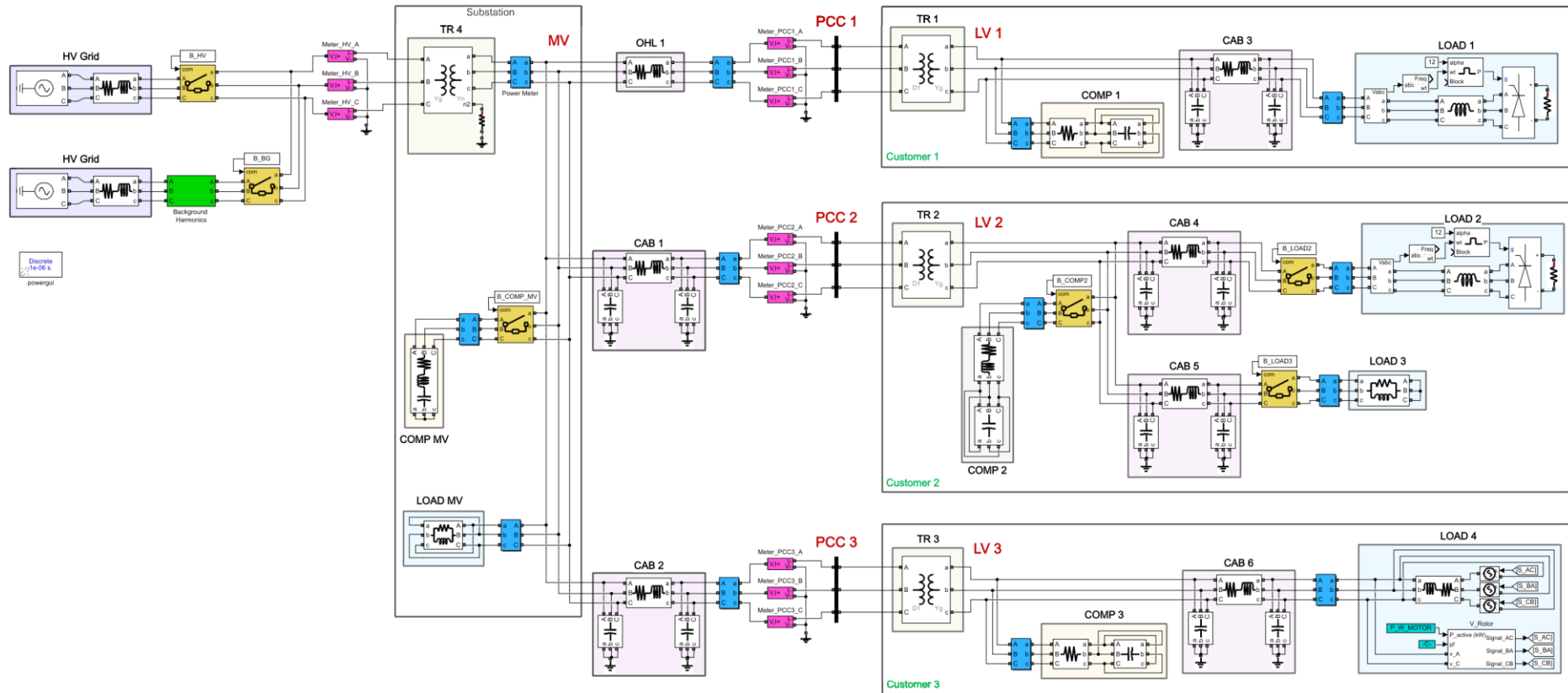
As maiores distorções harmônicas encontradas nas simulações foram correlatas às ordens 5^a, 7^a, 11^a e 13^a, conforme já era esperado pela característica dos retificadores trifásicos de 6 pulsos. Assim, a Tabela 4 sintetiza os indicadores de distorção harmônica de tensão individuais (DTHI) e total (DTHT) para os três PACs nas 6 condições de operação do IEEE-BTS-HCD. Os resultados apresentados correspondem aos da fase A do sistema, haja vista que se trata de um arranjo equilibrado.

Tabela 4 – Distorções harmônicas de tensão, individuais e totais, do IEEE-BTS-HCD.

		DTHI _{5^a}	DTHI _{7^a}	DTHI _{11^a}	DTHI _{13^a}	DTHT
Condição A	PAC 01	0,21%	0,16%	0,19%	0,05%	0,33%
	PAC 03	0,20%	0,15%	0,18%	0,04%	0,31%
Condição B	PAC 01	0,21%	0,16%	0,24%	0,04%	0,36%
	PAC 03	0,20%	0,15%	0,23%	0,03%	0,34%
Condição C	PAC 01	0,33%	0,30%	0,34%	0,14%	0,58%
	PAC 02	0,33%	0,30%	0,34%	0,15%	0,58%
	PAC 03	0,32%	0,29%	0,34%	0,14%	0,57%
Condição A-BG	PAC 01	0,41%	0,32%	0,26%	0,11%	0,59%
	PAC 03	0,39%	0,31%	0,25%	0,11%	0,57%
Condição B-BG	PAC 01	0,41%	0,33%	0,31%	0,09%	0,62%
	PAC 03	0,40%	0,32%	0,32%	0,08%	0,61%
Condição C-BG	PAC 01	0,54%	0,52%	0,49%	0,32%	0,95%
	PAC 02	0,54%	0,51%	0,50%	0,32%	0,96%
	PAC 03	0,53%	0,51%	0,50%	0,32%	0,94%

Fonte: Autoria própria.

Figura 13 – IEEE-BTS-HCD implementado no MATLAB/Simulink.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 5 apresenta os limites estabelecidos no Brasil para os indicadores de distorção de tensão para os barramentos entre 1 kV e 69 kV, tanto na Rede Básica [22] quanto na rede de distribuição [89]. Percebe-se, assim, que os valores de distorção, do sistema teste, estão abaixo dos limites vigentes no país.

Tabela 5 – Limites para os indicadores de distorção de tensão entre 1 kV e 69 kV no Brasil.

Limites	DTHI _{5^a}	DTHI _{7^a}	DTHI _{11^a}	DTHI _{13^a}	DTT _{<i>i</i>} *	DTHT
Rede Básica (limites globais inferiores)	5%	5%	3%	3%	-	6%
Distribuição	-	-	-	-	6%	8%

* Distorção harmônica total de tensão para componentes ímpares não múltiplos de 3.

Fonte: Autoria própria.

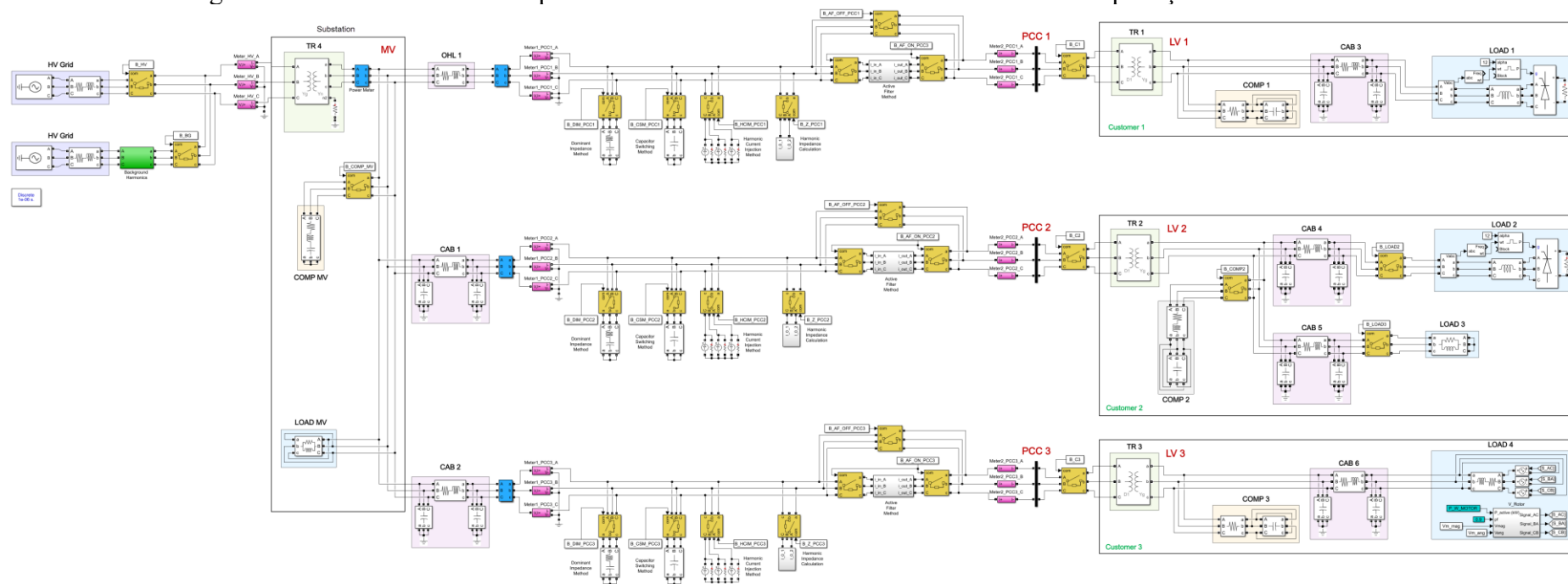
3.3 Aplicação dos métodos HCD no IEEE-BTS-HCD

Ao aplicar métodos HCD em um PAC que conecta um agente à rede elétrica, os outros agentes conectados passam a fazer parte do circuito equivalente do supridor. No PAC 01 da Figura 12, por exemplo, o consumidor considerado é o Consumidor 01, enquanto o supridor compreende o restante do sistema elétrico, que inclui o Consumidor 02, o Consumidor 03, a subestação e a Rede AT. Isto é válido para os outros PACs do IEEE-BTS-HCD.

Assim, todos os métodos para determinação das contribuições harmônicas apresentados na seção 2.3 foram implementados no modelo do IEEE-BTS-HCD, como apresentado na Figura 14. A seleção do método, a conexão e parametrização dos equipamentos auxiliares e a parametrização dos componentes do sistema para cada uma das 6 condições de operação também são realizadas pela utilização de *scripts* desenvolvidos no MATLAB. A utilização de *scripts* serve para automatizar a execução dos métodos. A aplicação dos métodos teve como foco a 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordens, pelos motivos já elencados.

Como o MVH necessita das impedâncias harmônicas equivalentes do sistema supridor e consumidor, utilizou-se o procedimento de varredura de frequência pela injeção de correntes inter-harmônicas, conforme sugerido na própria implementação do IEEE-BTS-HCD no PSCAD pela força tarefa do IEEE [33]. Este procedimento é detalhado em [98]. A aplicação desse procedimento também foi realizada utilizando o modelo da Figura 14. Determinar essas impedâncias não é um problema quando se realiza estudos computacionais, e existem diversos procedimentos propostos para este fim, conforme mencionado no Capítulo 2.

Figura 14 – IEEE-BTS-HCD implementado no MATLAB/Simulink considerando a aplicação de métodos HCD.



Fonte: Autoria própria.

Sobre as particularidades de cada método HCD implementado, com relação ao MID, as capacitâncias dos filtros foram ajustadas em $0,5 \mu\text{F}$ por fase e, a partir desses valores, foram calculados os respectivos indutores para sintonia do filtro em cada ordem harmônica de interesse. A topologia dos filtros foi padronizada como estrela isolada. Esses parâmetros levaram a índices de dominância superiores a 0,98. Já nas simulações do MCC, utilizou-se em todas as condições de operação capacitores de $1 \mu\text{F}$ por fase conectados nos PACs em estrela isolada. Tanto nas aplicações do MCC quanto do MID a variação da tensão fundamental dos PACs se apresentou inferior a 0,1%. Na aplicação do MICH, a magnitude da corrente perturbadora injetada foi de 0,5% da corrente fundamental do PAC, sendo a fonte de injeção de corrente conectada em estrela aterrada. Em se tratando do MFA, estabeleceu-se um controle retroalimentado para garantir o isolamento harmônico dos sistemas.

Por fim, com relação ao MCICA, sabe-se que sua aplicação se baseia na decomposição dos sinais de tensão e corrente harmônicos em seus componentes rápidos e lentos. Entretanto, o IEEE-BTS-HCD é simulado com condições de operação fixas, ou seja, não existem variações dos valores das tensões e correntes ao longo do tempo. Assim, para a aplicação do MCICA foi imposta uma variação rápida nos valores das tensões e correntes dos PACs, a partir de variações rápidas dos valores das fontes de correntes harmônicas equivalentes dos sistemas supridores e consumidores, calculadas pelo MVH. Por sua vez, para variação rápida das fontes de corrente, considerou-se uma distribuição de Laplace (super-gaussiana) com média zero e variância de 0,002, em um total de 1440 amostras, conforme proposto em [60]. Além disso, para a aplicação do MCICA utilizou-se o *script* do MATLAB disponibilizado em [88]. Contudo, uma outra opção a ser implementada futuramente está em adaptar e aprimorar o modelo e os *scripts* de simulação do IEEE-BTS-HCD no MATLAB/*Simulink* para aplicar o MCICA de forma mais realística, considerando variações rápidas e lentas nos parâmetros dos componentes do sistema, que originariam, por conseguinte, variações diversas nos valores de tensão e corrente medidos em cada PAC.

3.4 Resultados da aplicação dos métodos HCD selecionados no IEEE-BTS-HCD

Os resultados são apresentados e discutidos separadamente para cada condição de operação, visando a comparação e análise crítica dos métodos HCD. Os resultados apresentados correspondem aos da fase A do IEEE-BTS-HCD, haja vista que o sistema é equilibrado. As

tabelas apresentam as projeções dos fasores de contribuição do sistema supridor ($V_{S-PAC-pj-h}$) e do sistema consumidor ($V_{C-PAC-pj-h}$).

Os resultados de contribuição do MID, MCC, MICH, MIEC, MFA e MCICA foram comparados com o MVH, definido como método de referência. Para facilitar a análise e discussão, calculou-se as discrepâncias relativas das projeções utilizando a equação:

$$\Delta V_{X-PAC-pj-h} = \left(\frac{V_{X-PAC-pj-h}(MHCD) - V_{X-PAC-pj-h}(MVH)}{|V_{PAC-h}|} \right) \cdot 100\% \quad (39)$$

Sendo X correspondente a S , para o sistema supridor, ou C , consumidor. $MHCD$ equivale às grandezas obtidas pelos métodos MID, MCC, MICH, MIEC, MFA e MCICA.

Todos os resultados que acarretaram diferenças superiores a 5% encontram-se destacados nas tabelas. O destaque laranja representa aquelas discrepâncias entre 5% e 10%, e em amarelo as maiores que 10%.

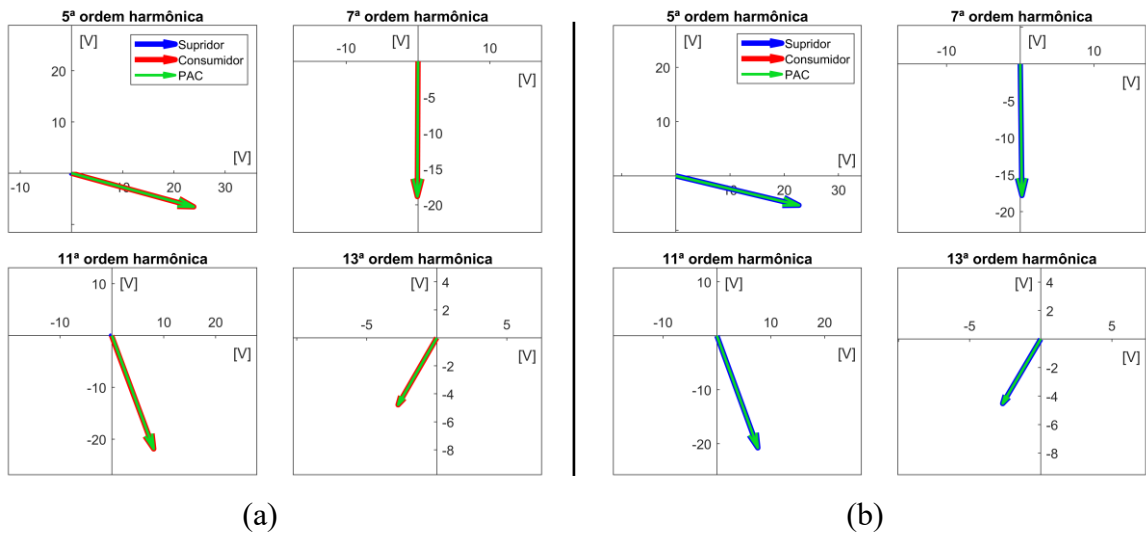
Com o intuito de tornar mais visual a interpretação dos resultados das contribuições dos agentes para com a tensão harmônica verificada nos PACs, incluiu-se os diagramas fasoriais das contribuições harmônicas calculadas por meio do MVH.

Além disso, de maneira complementar, o Apêndice A inclui os resultados obtidos por cada método para os fasores de contribuição de tensão do sistema supridor ($V_{S-PAC-h}$) e do sistema consumidor ($V_{C-PAC-h}$).

3.4.1 Condição A

Como o Consumidor 02 está desconectado do sistema, sabe-se que o Consumidor 01 é o único que contribui para as distorções harmônicas de tensão verificadas no PAC 01. No PAC 03, por outro lado, todas as contribuições de tensão vêm do sistema supridor, já que o Consumidor 03 não possui fontes harmônicas. Os resultados do MVH apresentados, tanto na Figura 15, quanto na Tabela 6, corroboram com essa expectativa.

Figura 15 – Fasores de contribuição do sistema supridor ($\underline{V}_{S-PAC-h}$) e consumidor ($\underline{V}_{C-PAC-h}$) sobre a tensão harmônica do PAC (\underline{V}_{PAC-h}) obtidos pelo MVH para o IEEE-BTS-HCD - Condição A (a) PAC 01 e (b) PAC 03.



Fonte: Autoria própria.

Comparando os resultados obtidos para os demais métodos pela Tabela 6, tanto para o PAC 01, quanto para o PAC 03, percebe-se a convergência destes com o MVH, com exceção do MCICA que em algumas ordens harmônicas proporcionou resultados das contribuições discrepantes. Percebe-se, nestas situações, que as contribuições dos sistemas supridor e consumidor foram calculadas de maneira trocada. Isto é, as fontes harmônicas não apresentam nenhuma contribuição, sendo praticamente toda a tensão harmônica atribuída aos componentes lineares.

Com relação ao MIEC, no PAC 03 na 5ª e 7ª ordens, as condições das equações (24) e (25) não foram atendidas, tornando a contribuição do consumidor nula. Entretanto, mesmo sem a imposição dessas condições, o método levou a resultados coerentes.

Tabela 6 – Métodos HCD aplicados ao IEEE-BTS-HCD - Condição A.

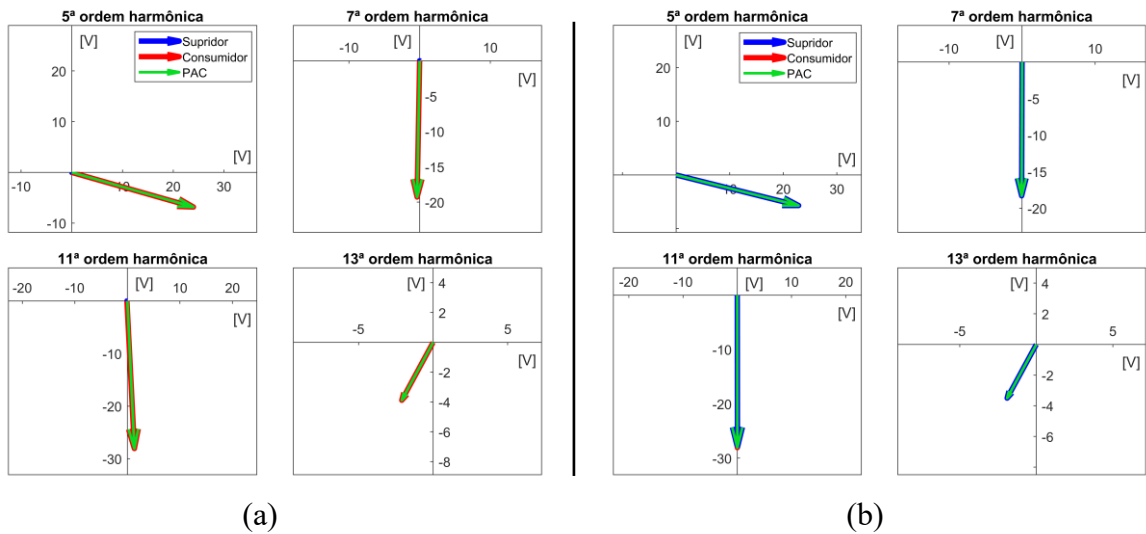
Condição A		PAC 01		PAC 03	
		$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$	$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$
5 ^a ordem	MVH	0,0	24,7	23,3	0,0
	MIEC	0,0	24,7	23,9	0,0
	MFA	0,0	24,7	23,3	0,0
	MID	0,1	24,6	23,3	0,0
	MCC	0,0	24,7	23,3	0,0
	MICH	0,0	24,7	23,3	0,0
	MCICA	25,2	-0,4	23,7	-0,3
7 ^a ordem	MVH	0,0	18,9	17,8	0,0
	MIEC	0,0	18,8	18,1	0,0
	MFA	0,0	18,8	17,8	0,0
	MID	0,0	18,8	17,8	0,0
	MCC	0,0	18,8	17,8	0,0
	MICH	0,0	18,9	17,8	0,0
	MCICA	0,2	18,7	0,1	17,7
11 ^a ordem	MVH	0,0	23,3	22,1	0,0
	MIEC	0,0	23,3	22,1	0,0
	MFA	0,0	23,3	22,2	-0,1
	MID	0,0	23,3	22,1	0,0
	MCC	0,0	23,3	22,1	0,0
	MICH	0,0	23,3	22,1	0,0
	MCICA	23,1	0,2	-0,3	22,4
13 ^a ordem	MVH	0,0	5,5	5,3	0,0
	MIEC	0,0	5,5	5,2	0,1
	MFA	0,0	5,5	5,3	0,0
	MID	0,0	5,5	5,3	0,0
	MCC	0,0	5,5	5,3	0,0
	MICH	0,0	5,5	5,3	0,0
	MCICA	0,0	5,5	0,1	5,2

Fonte: Autoria própria.

3.4.2 Condição B

Na condição B, a situação é similar à Condição A. Embora os parâmetros do Consumidor 03 sejam diferentes, ele permanece linear, isto é, sem fontes harmônicas. Por isso, no PAC 01, todas as contribuições de tensão são causadas pelo Consumidor 01. No PAC 03, portanto, o sistema supridor contribui 100% com as distorções de tensão, como verificado nos resultados do MVH na Figura 16 e na Tabela 7.

Figura 16 – Fasores de contribuição do sistema supridor ($\underline{V}_{S-PAC-h}$) e consumidor ($\underline{V}_{C-PAC-h}$) sobre a tensão harmônica do PAC (\underline{V}_{PAC-h}) obtidos pelo MVH para o IEEE-BTS-HCD - Condição B (a) PAC 01 e (b) PAC 03.



Fonte: Autoria própria.

Ao comparar os resultados dos métodos MFA, MID, MCC e MICH, pode-se verificar que estes convergem com o MVH. Os percentuais de contribuição permaneceram dentro da faixa de tolerância estabelecida.

O MIEC apresentou resultados coerentes na maioria dos casos, com exceção daquele obtido para a 11ª ordem no PAC 03, no qual o MIEC atribuiu um valor de 7,5 V para a projeção do fasor de contribuição do Consumidor 03, totalmente linear. Em termos percentuais isso corresponderia a um índice de contribuição de 26,7% para o Consumidor 03. No caso da 13ª ordem no PAC 03, a condição do MIEC que torna a contribuição do consumidor nula foi atendida, e por isso o resultado esteve próximo ao do MVH.

Quanto ao MCICA, em duas situações as contribuições harmônicas foram encontradas de maneira invertida, quais sejam: a 13ª ordem do PAC 01 e a 5ª ordem do PAC 03, tornando todas as contribuições como sendo frutos dos agentes lineares, sem nenhuma fonte harmônica.

Tabela 7 – Métodos HCD aplicados ao IEEE-BTS-HCD - Condição B.

Condição B	PAC 01		PAC 03		
	$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$	$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$	
5 ^a ordem	MVH	0,0	24,9	23,6	0,0
	MIEC	0,0	24,9	23,9	0,0
	MFA	0,0	24,9	23,6	0,0
	MID	0,1	24,9	23,6	0,0
	MCC	0,0	24,9	23,6	0,0
	MICH	0,0	24,9	23,6	0,0
	MCICA	-0,5	25,4	-0,4	24,0
7 ^a ordem	MVH	0,0	19,3	18,3	0,0
	MIEC	0,0	19,3	18,1	0,2
	MFA	0,0	19,3	18,3	0,0
	MID	0,0	19,3	18,3	0,0
	MCC	0,0	19,3	18,3	0,0
	MICH	0,0	19,3	18,3	0,0
	MCICA	0,1	19,2	18,2	0,1
11 ^a ordem	MVH	0,0	28,1	28,0	0,1
	MIEC	0,0	28,1	20,6	7,5
	MFA	0,0	28,1	28,1	0,0
	MID	0,0	28,1	28,1	0,0
	MCC	-0,1	28,2	28,1	0,0
	MICH	0,0	28,1	28,1	0,0
	MCICA	0,3	27,8	28,5	-0,4
13 ^a ordem	MVH	0,0	4,4	4,0	0,0
	MIEC	0,0	4,4	5,2	0,0
	MFA	0,0	4,4	4,0	0,0
	MID	0,0	4,4	4,0	0,0
	MCC	0,0	4,4	4,0	0,0
	MICH	0,0	4,4	4,0	0,0
	MCICA	4,3	0,1	3,9	0,0

Fonte: Autoria própria.

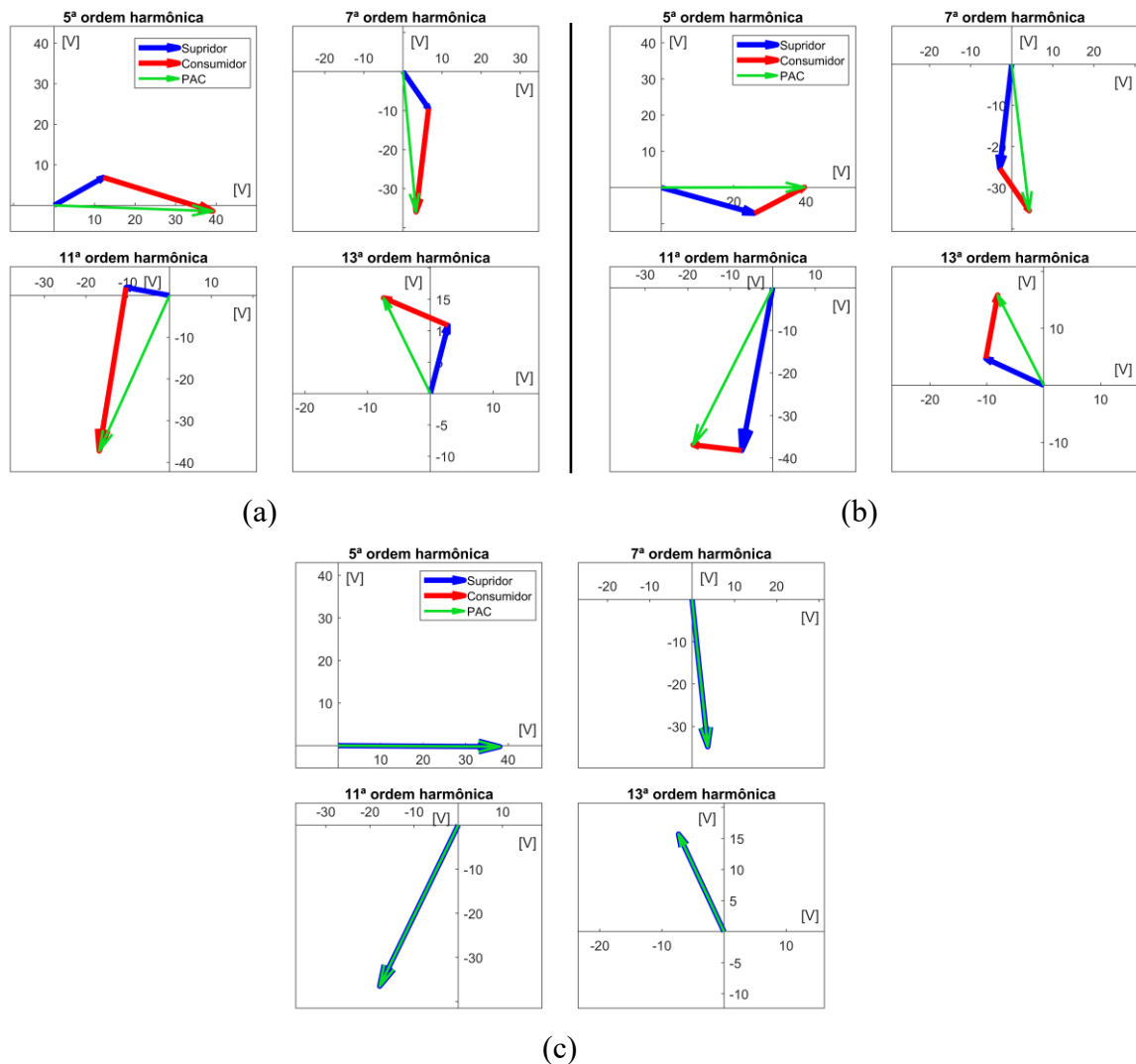
3.4.3 Condição C

Conforme mostrado na Figura 17 e na Tabela 8, para o MVH, no PAC 01 e no PAC 02, ambas as partes envolvidas (supridor e consumidor) podem contribuir para a tensão harmônica, pois tanto o Consumidor 01, quanto o Consumidor 02, possuem cargas não lineares. Assim, no PAC 01 para a 5^a, 7^a e 11^a ordens, em termos das projeções, o Consumidor 01 apresenta maior contribuição para a distorção de tensão. O oposto acontece no PAC 02, pois o sistema supridor contribui mais nestas ordens. Para a 13^a ordem, ambas as partes contribuem quase igualmente para a distorção de tensão. A natureza complementar das contribuições do Consumidor 01 e do

Consumidor 02 é coerente, pois apenas esses agentes apresentam cargas não lineares nesta condição no IEEE-BTS-HCD.

No PAC 03, por sua vez, as fontes harmônicas dos Consumidores 01 e 02 fazem parte do sistema supridor e o Consumidor 03 continua sendo linear, não possuindo fontes harmônicas. Portanto, toda contribuição para a distorção de tensão desse PAC advém do supridor.

Figura 17 – Fasores de contribuição do sistema supridor ($\underline{V}_{S-PAC-h}$) e consumidor ($\underline{V}_{C-PAC-h}$) sobre a tensão harmônica do PAC (\underline{V}_{PAC-h}) obtidos pelo MVH para o IEEE-BTS-HCD - Condição C (a) PAC 01, (b) PAC 02 e (c) PAC 03.



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar os resultados do MFA, MID, MCC e MICH, pode-se verificar que estes apresentaram resultados muito próximos aos do MVH para os valores de contribuição.

O MCICA também apresentou resultados convergentes com os do MVH, a única exceção aconteceu na 7ª ordem no PAC 03, onde as contribuições dos sistemas supridor e

consumidor foram obtidas de forma trocada. Assim, mesmo o Consumidor 03 sendo totalmente linear, praticamente 100% da contribuição foi atribuída a ele.

O MIEC, por sua vez, apresentou discrepâncias maiores do que 10% para duas ordens harmônicas do PAC 01 (11ª e 13ª ordens). Na 11ª ordem, inclusive, foi atribuído ao sistema supridor um percentual de contribuição negativa, o que significa que este estaria atuando no sentido de diminuir a distorção do PAC.

Tabela 8 – Métodos HCD aplicados ao IEEE-BTS-HCD - Condição C.

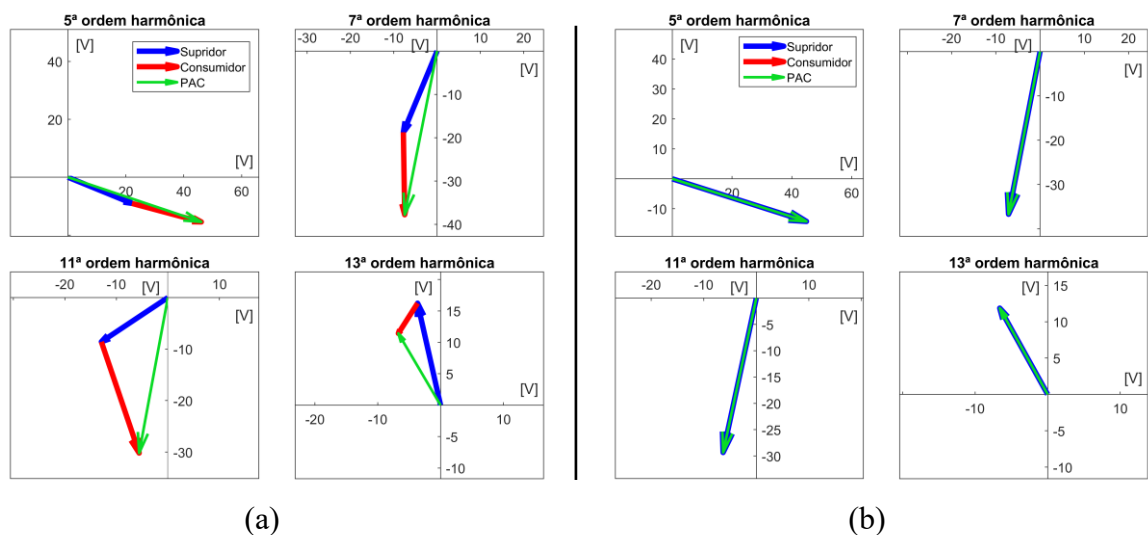
Condição C	PAC 01		PAC 02		PAC 03		
	$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$	$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$	$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$	
5ª ordem	MVH	11,9	27,3	25,8	13,9	38,0	0,0
	MIEC	11,6	27,6	27,2	12,4	39,0	0,0
	MFA	11,9	27,3	25,8	13,8	38,0	0,0
	MID	11,9	27,3	25,8	13,8	38,0	0,0
	MCC	11,8	27,4	26,5	13,1	38,0	0,0
	MICH	12,0	27,2	25,8	13,8	38,0	0,0
	MCICA	12,4	26,8	26,4	13,1	38,8	-0,8
7ª ordem	MVH	10,1	26,0	24,7	11,1	35,0	0,0
	MIEC	9,3	26,8	25,5	10,4	35,8	0,0
	MFA	10,1	25,9	24,8	11,1	35,0	0,0
	MID	10,1	25,9	24,7	11,1	35,0	0,0
	MCC	9,9	26,1	25,1	10,7	35,0	0,0
	MICH	10,1	26,0	24,8	11,1	35,0	0,0
	MCICA	10,5	25,5	24,5	11,3	-0,4	35,4
11ª ordem	MVH	2,5	38,3	37,4	4,0	40,6	0,0
	MIEC	-3,2	44,0	38,1	3,3	40,6	0,1
	MFA	2,6	38,2	37,4	4,0	40,7	-0,1
	MID	2,7	38,2	37,3	4,0	40,6	0,0
	MCC	2,2	38,6	37,8	3,6	40,6	0,0
	MICH	2,5	38,4	37,5	3,9	40,6	0,0
	MCICA	2,4	38,5	36,7	4,7	40,5	0,1
13ª ordem	MVH	8,5	8,5	8,8	9,0	17,3	0,0
	MIEC	6,2	10,8	8,7	9,1	17,6	0,0
	MFA	8,5	8,5	8,8	8,9	17,3	0,0
	MID	8,4	8,5	8,8	8,9	17,3	0,0
	MCC	9,1	7,9	8,4	9,4	17,3	0,0
	MICH	8,5	8,5	8,8	8,9	17,3	0,0
	MCICA	8,8	8,1	8,6	9,2	18,0	-0,7

Fonte: Autoria própria.

3.4.4 Condição A-BG

A partir desta condição, tem-se distorções harmônicas pré-existentes na Rede AT. Isso significa que agora, no PAC 01, existem fontes harmônicas tanto do lado do sistema supridor quanto do lado do consumidor. Portanto, as contribuições podem advir de ambas as partes. No PAC 03, as contribuições são somente do supridor, pois tanto o Consumidor 01 quanto as harmônicas pré-existentes da Rede AT fazem parte do sistema supridor. Essa leitura se confirma quando se avalia os resultados do MVH na Figura 18 e na Tabela 9. Assim, no PAC 01 a contribuição, em termos das projeções, é compartilhada uniformemente para a 5ª e 7ª ordens, mas para a 11ª ordem o Consumidor 01 contribui mais do que concessionária. Já na 13ª ordem, percebe-se a projeção do fasor de contribuição do Consumidor 01, estabelecida pelo MVH, é negativa, o que, como já explicado, significa que, nesta ordem, ele contribui para reduzir a distorção do PAC. No PAC 03, assim como nas condições anteriores, toda a contribuição continua sendo respectiva ao sistema supridor.

Figura 18 – Fasores de contribuição do sistema supridor ($\underline{V}_{S-PAC-h}$) e consumidor ($\underline{V}_{C-PAC-h}$) sobre a tensão harmônica do PAC (\underline{V}_{PAC-h}) obtidos pelo MVH para o IEEE-BTS-HCD - Condição A-BG (a) PAC 01 e (b) PAC 03.



Fonte: Autoria própria.

Comparando agora os resultados dos demais métodos com o MVH, verifica-se mais uma vez a convergência de resultados do MFA, MID, MCC e MICH.

O MIEC, apresentou discrepâncias superiores a 10% para o PAC 01 na 11ª e 13ª ordens. Com relação à 13ª ordem, percebe-se que, segundo o MIEC, a contribuição do consumidor é nula, enquanto para o MVH o Consumidor 01 apresenta contribuição, apesar de ser negativa.

Com relação ao MCICA, na 5ª ordem do PAC 01, este exibiu certa discrepância, porém entre 5% e 10%. Entretanto, para o PAC 03, o método atribuiu a contribuição de forma invertida para todas as ordens harmônicas, tornando o Consumidor 03 culpado por toda a tensão harmônica do PAC, apesar deste ser composto somente por componentes lineares.

Tabela 9 – Métodos HCD aplicados ao IEEE-BTS-HCD - Condição A-BG.

Condição A-BG	PAC 01		PAC 03		
	$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$	$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$	
5ª ordem	MVH	23,8	24,7	47,1	0,0
	MIEC	23,6	25,0	48,1	0,0
	MFA	23,8	24,8	47,1	0,0
	MID	23,9	24,7	47,1	0,0
	MCC	24,4	24,2	47,1	0,0
	MICH	23,9	24,7	47,1	0,0
	MCICA	26,5	22,1	-0,7	47,8
7ª ordem	MVH	19,9	18,6	37,4	0,0
	MIEC	19,3	19,2	38,0	0,0
	MFA	20,0	18,6	37,4	0,0
	MID	20,0	18,6	37,4	0,0
	MCC	19,9	18,6	37,4	0,0
	MICH	19,9	18,7	37,4	0,0
	MCICA	19,3	19,2	0,5	36,9
11ª ordem	MVH	10,8	19,9	30,0	0,0
	MIEC	16,1	14,6	29,8	0,2
	MFA	10,7	20,0	30,1	-0,1
	MID	10,8	19,9	30,0	0,0
	MCC	10,9	19,8	30,0	0,0
	MICH	10,9	19,8	30,0	0,0
	MCICA	10,1	20,6	0,2	29,8
13ª ordem	MVH	15,8	-2,6	13,6	0,0
	MIEC	17,7	0,0	13,3	0,3
	MFA	15,8	-2,6	13,6	0,0
	MID	15,8	-2,5	13,6	0,0
	MCC	15,7	-2,5	13,6	0,0
	MICH	15,8	-2,6	13,6	0,0
	MCICA	16,1	-2,8	-0,3	13,8

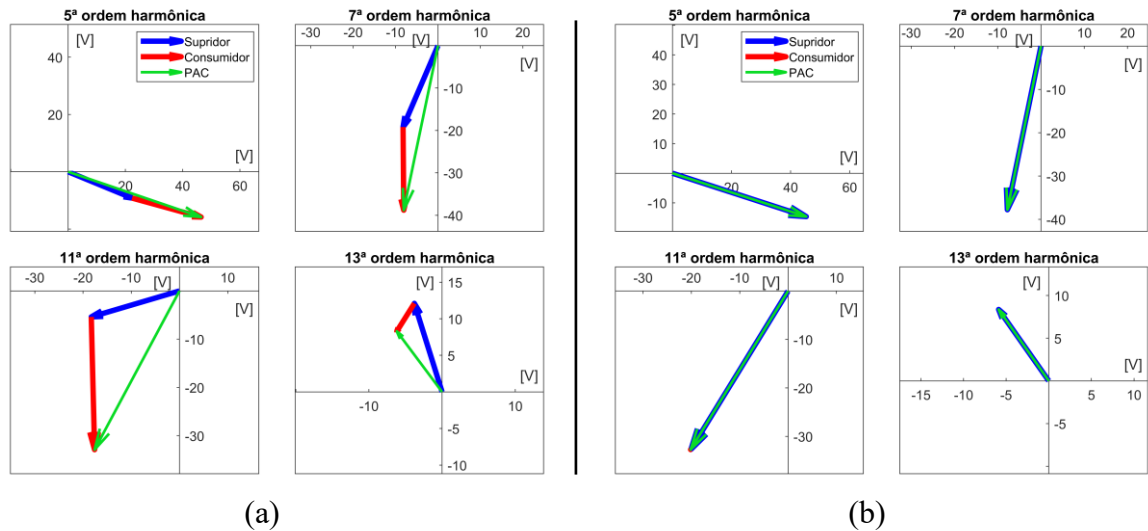
Fonte: Autoria própria.

3.4.5 Condição B-BG

Aqui tem-se uma situação muito similar à Condição A-BG. Os níveis de harmônicos pré-existentes na Rede AT são os mesmos e os parâmetros do Consumidor 01 também. A diferença está nos parâmetros do Consumidor 03, mas ele permanece sem conter fontes

harmônicas. Por tanto, as expectativas são mais uma vez corroboradas pelos resultados atingidos pelo MVH dados na Figura 19 e na Tabela 10.

Figura 19 – Fasores de contribuição do sistema supridor ($\underline{V}_{S-PAC-h}$) e consumidor ($\underline{V}_{C-PAC-h}$) sobre a tensão harmônica do PAC (\underline{V}_{PAC-h}) obtidos pelo MVH para o IEEE-BTS-HCD - Condição B-BG (a) PAC 01 e (b) PAC 03.



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que o MFA, MID, MCC e MICH apresentaram resultados coerentes e muito próximos do MVH para todos os PACs e ordens harmônicas avaliadas.

O MIEC apresentou discrepâncias no PAC 01 (11ª e 13ª ordens), no entanto, o que mais chama atenção é a discrepância observada por esse método na 11ª ordem no PAC 03, pois, mesmo o Consumidor 03 não apresentando nenhuma carga não linear, o MIEC indica que, em termos das projeções, ele contribui com mais de 27% para com a distorção harmônica de 11ª ordem medida no PAC 03.

Similar ao verificado na Condição A-BG, o MCICA atribuiu, de forma equivocada, toda a contribuição de 7ª, 11ª e 13ª ordens no PAC 03 para o Consumidor 03.

Tabela 10 – Métodos HCD aplicados ao IEEE-BTS-HCD - Condição B-BG.

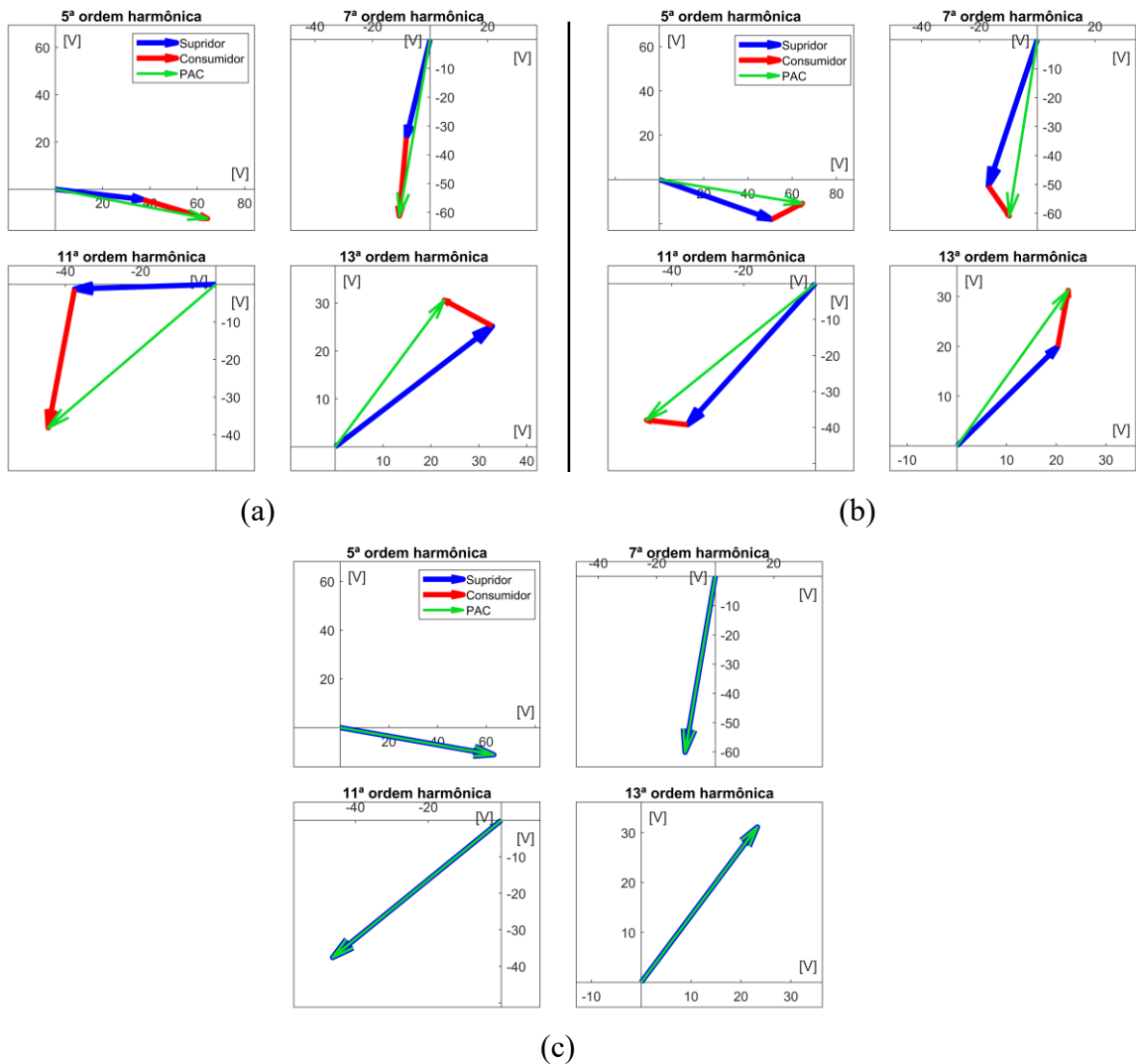
Condição B-BG	PAC 01		PAC 03		
	$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$	$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$	
5 ^a ordem	MVH	24,1	25,0	47,6	0,0
	MIEC	23,8	25,3	48,1	0,0
	MFA	24,1	25,0	47,6	0,0
	MID	24,1	24,9	47,6	0,0
	MCC	24,6	24,4	47,6	0,0
	MICH	24,1	25,0	47,6	0,0
	MCICA	22,3	26,7	48,3	-0,7
7 ^a ordem	MVH	20,5	19,2	38,6	0,0
	MIEC	19,9	19,8	38,0	0,6
	MFA	20,5	19,1	38,6	0,0
	MID	20,5	19,1	38,6	0,0
	MCC	20,7	18,9	38,6	0,0
	MICH	20,4	19,2	38,6	0,0
	MCICA	19,8	19,8	0,5	38,1
11 ^a ordem	MVH	13,4	23,9	38,4	0,1
	MIEC	17,5	19,8	28,0	10,5
	MFA	13,3	24,0	38,4	0,0
	MID	13,4	23,9	38,4	0,0
	MCC	13,6	23,7	38,4	0,0
	MICH	13,5	23,8	38,4	0,0
	MCICA	12,5	24,8	0,6	37,8
13 ^a ordem	MVH	12,0	-1,6	10,2	0,0
	MIEC	13,1	0,0	13,2	0,0
	MFA	12,0	-1,6	10,2	0,0
	MID	11,9	-1,5	10,2	0,0
	MCC	12,5	-2,1	10,2	0,0
	MICH	12,0	-1,6	10,2	0,0
	MCICA	12,2	-1,8	-0,2	10,4

Fonte: Autoria própria.

3.4.6 Condição C-BG

Por fim, a Condição C-BG é similar a Condição C, no entanto, os valores das contribuições harmônicas nos PAC 01 e PAC 02 são diferentes pois foram inseridas fontes de distorção harmônicas na Rede AT. Já no PAC 03, como o Consumidor 03 permanece sem fontes harmônicas, toda a contribuição vem da rede do supridor, onde estão conectados os Consumidores 01 e 02 e a Rede AT. Estes resultados podem ser verificados para o MVH na Figura 20 e na Tabela 11. Destaca-se que na 13^a ordem do PAC 01, mais uma vez o Consumidor 01 atua no sentido de diminuir a distorção de tensão no PAC, por isso sua projeção e, conseqüentemente, sua contribuição é negativa.

Figura 20 – Fasores de contribuição do sistema supridor ($\underline{V}_{S-PAC-h}$) e consumidor ($\underline{V}_{C-PAC-h}$) sobre a tensão harmônica do PAC (\underline{V}_{PAC-h}) obtidos pelo MVH para o IEEE-BTS-HCD - Condição C-BG (a) PAC 01, (b) PAC 02 e (c) PAC 03.



Fonte: Autoria própria.

Nesta última condição avaliada, verifica-se mais uma vez que os métodos MFA, MID, MCC e MICH apresentaram resultados coerentes e muito similares aos do MVH, com variações inferiores a 5%. No caso do MIEC, este divergiu dos demais em mais de 5% na 13ª ordem do PAC 01. Apesar do MCICA ter apresentado resultados muito correlatos aos do MVH, na 7ª ordem do PAC 03 toda a contribuição foi atribuída ao Consumidor 03, que, no entanto, permaneceu linear em todas as condições de operação estudadas.

Tabela 11 – Métodos HCD aplicados ao IEEE-BTS-HCD - Condição C-BG.

Condição C-BG	PAC 01		PAC 02		PAC 03		
	$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$	$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$	$V_{S-PAC-pj}$	$V_{C-PAC-pj}$	
5 ^a ordem	MVH	37,2	28,3	53,0	12,5	64,1	0,0
	MIEC	36,5	29,0	55,9	9,6	65,7	0,0
	MFA	37,2	28,3	53,1	12,5	64,1	0,0
	MID	37,2	28,3	53,0	12,5	64,1	0,0
	MCC	38,3	27,3	54,0	11,5	64,1	0,0
	MICH	37,2	28,3	53,0	12,5	64,1	0,0
	MCICA	40,7	24,8	54,1	11,4	65,1	-1,1
7 ^a ordem	MVH	35,0	27,2	52,6	9,1	61,0	0,0
	MIEC	33,4	28,8	54,4	7,3	62,3	0,0
	MFA	35,2	27,0	52,6	9,0	61,0	0,0
	MID	35,2	27,0	52,6	9,1	61,0	0,0
	MCC	35,9	26,3	53,1	8,5	61,0	0,0
	MICH	35,0	27,2	52,6	9,0	61,0	0,0
	MCICA	34,6	27,6	51,7	10,0	0,3	60,7
11 ^a ordem	MVH	29,4	29,4	52,4	8,1	59,6	0,0
	MIEC	30,9	27,8	52,6	7,9	59,4	0,2
	MFA	29,3	29,5	52,6	7,9	59,7	-0,1
	MID	29,2	29,5	52,4	8,1	59,6	0,0
	MCC	28,4	30,3	52,7	7,7	59,6	0,0
	MICH	29,5	29,2	52,4	8,1	59,6	0,0
	MCICA	28,0	30,7	51,7	8,8	59,0	0,6
13 ^a ordem	MVH	39,8	-1,7	28,0	10,4	38,9	0,0
	MIEC	34,0	4,1	27,0	11,4	39,2	0,0
	MFA	39,8	-1,6	28,1	10,3	38,9	0,0
	MID	39,2	-1,0	28,2	10,2	38,9	0,0
	MCC	39,4	-1,2	28,5	10,0	38,9	0,0
	MICH	39,7	-1,6	28,1	10,3	38,9	0,0
	MCICA	40,8	-2,7	29,0	9,4	40,8	-1,9

Fonte: Autoria própria.

3.4.7 Discussão geral acerca dos resultados

Para as 6 condições de operação avaliadas, os métodos MFA, MID, MCC e MICH apresentaram resultados extremamente próximos aos do MVH, demonstrando a convergência dos métodos para com a referência estabelecida, já que as discrepâncias observadas foram inferiores a 10% em comparação ao MVH. Portanto, os resultados dos métodos foram bastante convergentes e coerentes, o que é um fato importante, pois estes métodos utilizam estratégias diferentes para avaliar as contribuições harmônicas de tensão e mesmo assim convergiram para um resultado em comum.

O MIEC apresentou resultados consistentes, concordando com as expectativas na maior parte dos casos. Porém, em algumas situações (destacadas em amarelo nas Tabela 6 a Tabela 11), os seus resultados apresentaram discrepâncias superiores à faixa de tolerância estabelecida em relação ao MVH. Essas discrepâncias podem ser explicadas examinando atentamente as equações do MIEC. Comparando (22) e (23) com as respectivas equações (9) e (10) do MVH, fica evidente que as equações do MIEC para cálculo das contribuições harmônicas do sistema supridor e do consumidor representam um caso particular do MVH, que assume que a impedância do consumidor é muito maior (em magnitude) do que a impedância do sistema supridor. Assim, os resultados do MIEC poderiam apresentar discrepâncias se esta condição não fosse atendida, ou seja, se as impedâncias do consumidor e do supridor, em uma dada ordem harmônica, tivessem a mesma ordem de grandeza. Para testar esta hipótese, as razões entre as impedâncias do consumidor e do supridor, $|\underline{Z}_{C-h}|/|\underline{Z}_{S-h}|$, foram calculadas para todas as 6 condições de operação em todos os PACs e ordens harmônicas avaliadas, conforme mostrado na Tabela 12.

Os resultados mostram que em todas as situações que o MIEC apresentou desvios superiores à faixa de tolerância estabelecida, a razão $|\underline{Z}_{C-h}|/|\underline{Z}_{S-h}|$ foi inferior a 10. Portanto, pode-se afirmar que a condição ($\underline{Z}_{C-h} \gg \underline{Z}_{S-h}$), necessária para o bom desempenho do método, pode não ser atendida se houver ressonâncias no PAC sob análise, por exemplo. Além disso, em outras situações a razão $|\underline{Z}_{C-h}|/|\underline{Z}_{S-h}|$ também foi inferior a 10, no entanto, o MIEC não proporcionou erros significativos. Isso se deve, principalmente, a duas possíveis causas:

- a) não haver fontes harmônicas no lado do supridor, ou seja, quando o consumidor foi desconectado, a distorção de *background* medida foi igual a zero ($\underline{V}_{S-PAC-h} = \underline{V}_{BG-h} = 0$). Consequentemente, a tensão harmônica medida no PAC após a conexão do consumidor foi totalmente atribuída a ele, independentemente da relação $|\underline{Z}_{C-h}|/|\underline{Z}_{S-h}|$;
- b) as condições das equações (24) e (25) do MIEC não terem ocorrido e por isso a contribuição do consumidor ter sido nula, apesar do método ter indicado, inicialmente, uma dada contribuição do consumidor.

Além da relação $|\underline{Z}_{C-h}|/|\underline{Z}_{S-h}|$ para as condições de operação do IEEE-BTS-HCD, também são mostrados, no Apêndice B, os gráficos das impedâncias *versus* frequência dos sistemas supridores e consumidores, vistos a partir dos PACs em cada condições de operação do IEEE-BTS-HCD.

Tabela 12 – Relação $|Z_{C-h}|/|Z_{S-h}|$ para as condições de operação do IEEE-BTS-HCD.

		5ª ordem	7ª ordem	11ª ordem	13ª ordem
Condição A	PAC 01	66,3	24,8	2,1	6,7
	PAC 03	44,5	58,4	287,7	46,1
Condição B	PAC 01	65,5	24,3	1,6	8,9
	PAC 03	96,6	63,5	2,8	2,9
Condição C	PAC 01	58,3	17,9	1,0	4,3
	PAC 02	17,2	24,5	31,6	24,3
	PAC 03	39,2	42,0	173,9	24,7
Condição A-BG	PAC 01	67,0	25,1	2,1	6,7
	PAC 03	44,5	58,4	287,6	46,1
Condição B-BG	PAC 01	65,3	24,3	1,6	8,9
	PAC 03	96,7	63,6	2,8	2,9
Condição C-BG	PAC 01	58,4	17,9	1,0	4,3
	PAC 02	17,2	24,5	31,6	24,3
	PAC 03	39,2	42,0	173,9	24,7

Fonte: Autoria própria.

Logo, o método MIEC não atende as circunstâncias em que a impedância do consumidor possui a mesma ordem de grandeza da impedância do supridor. Essas situações podem ocorrer com certa frequência em sistemas elétricos, e correspondem a condições de ressonâncias, por isso, o emprego deste método demanda certa cautela.

Analisando agora as situações em que o MCICA calculou as contribuições dos agentes de maneira invertida, percebe-se que todas essas ocorrências foram verificadas em condições de operação/PACs em que havia fontes harmônicas somente em um dos circuitos equivalentes dos agentes. Ademais, sabe-se que outros fatores podem influenciar nos resultados do MCICA, como exemplo da quantidade de medições de tensão e corrente utilizadas (amostras) e a possibilidade de as impedâncias harmônicas sofrerem alterações consideráveis durante o período avaliado pelo método.

Outro ponto que merece ser exposto, diz respeito à condição estabelecida pelo MCICA de que os sinais das fontes (I_{S-h} e I_{C-h}) sejam estatisticamente independentes e com distribuições de probabilidade não-gaussiana. Apesar de ter sido reportado na literatura que essa condição é atendida em sistemas elétricos [113], trabalhos mais recentes têm destacado que, em situações em que existem conversores de eletrônica de potência, pode existir certa correlação entre as fontes harmônicas e os sinais de tensão e corrente da rede elétrica. Esse é o caso de plantas de geração renovável não convencional, em que as estratégias de controle dos inversores precisam amostrar os sinais de tensão e corrente da rede [114], [115].

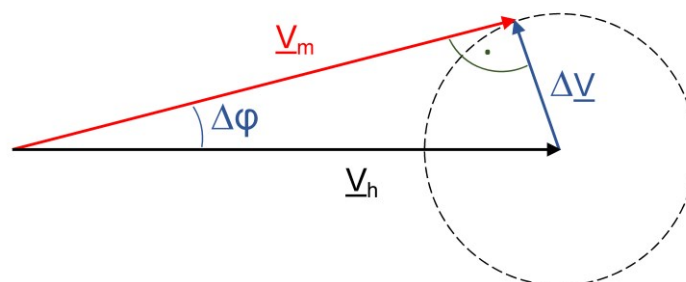
Por isso é recomendada cautela antes de interpretar os resultados de procedimentos HCD como uma afirmação conclusiva devido à possível natureza variável das impedâncias e das injeções harmônicas ao longo do tempo, bem como à possibilidade de ocorrência de ressonâncias nas ordens harmônicas avaliadas. Entretanto, de forma geral, o resultado mais notável deste estudo é que cinco métodos HCD – MVH, MID, MCC, MICH e MFA – levaram a valores de contribuição coerentes e convergentes.

3.5 Análise de sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição

Medidores de qualidade de energia podem incluir incertezas de medição, por esse motivo, além de avaliar o desempenho dos métodos HCD em um sistema simulado controlado, é importante avaliar o seu desempenho frente a erros nos dados de entrada para aprimorar a aplicação prática destes. Portanto, esta seção apresenta uma análise de sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição.

Para as magnitudes das medições de tensão e corrente, foram considerados erros máximos de $\pm 5\%$ [116]. Já que todos os métodos empregam grandezas fasoriais de tensão e corrente (magnitudes e ângulos de fase), também se considerou a possibilidade de erros nos ângulos de fase. O erro máximo considerado para os ângulos de fase foi de $\pm 2,87^\circ$. Esse valor foi estabelecido em [117] a partir do erro máximo de $\pm 5\%$ para as magnitudes. Neste tocante, assume-se que a incerteza na medição de uma grandeza fasorial descreve um círculo no plano complexo em torno do valor real com raio limítrofe do erro de magnitude máximo (5%). Assim, o erro máximo do ângulo de fase foi obtido quando o valor medido era tangente ao círculo, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Incerteza de medição no plano complexo. \underline{V}_h é o fasor real, \underline{V}_m é o fasor medido, $\Delta \underline{V}$ representa o erro de magnitude e $\Delta \varphi$ é o erro no ângulo de fase.

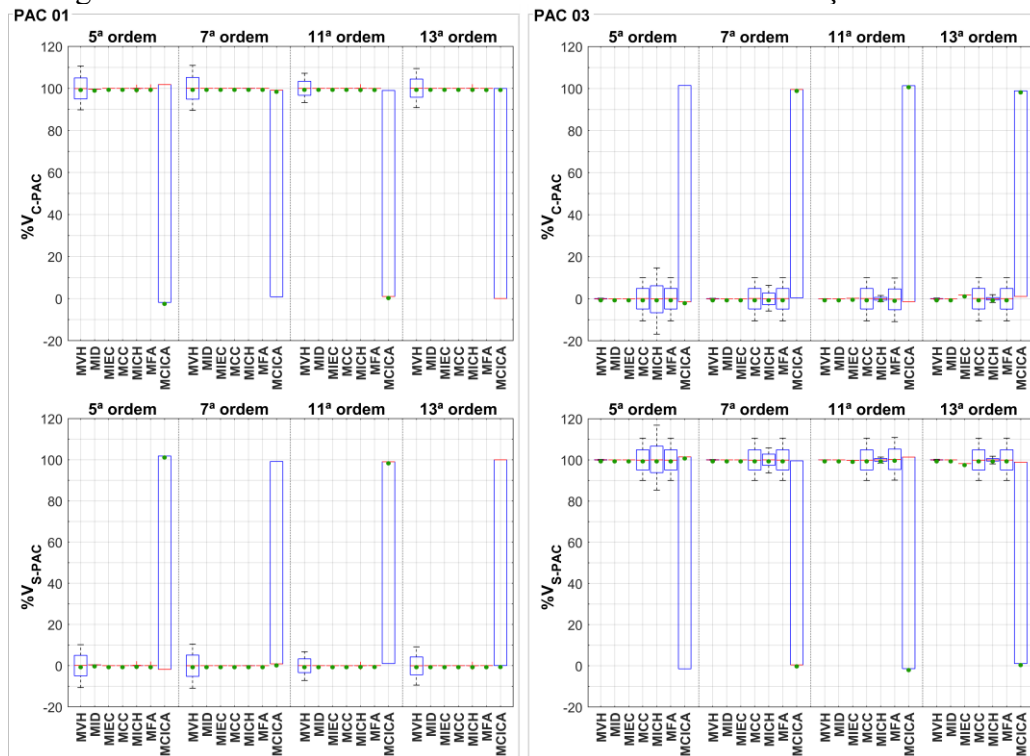


Fonte: Adaptado de [117].

Além disso, [117] destaca que o erro máximo do ângulo de fase depende da magnitude da grandeza harmônica. Quando a tensão harmônica é igual ou maior que 1% da tensão fundamental (e respectivamente a corrente harmônica maior ou igual a 3% da corrente fundamental), o erro máximo do ângulo de fase permanece constante com o valor de $\pm 2,87^\circ$, no entanto, para magnitudes harmônicas menores, este valor aumenta consideravelmente.

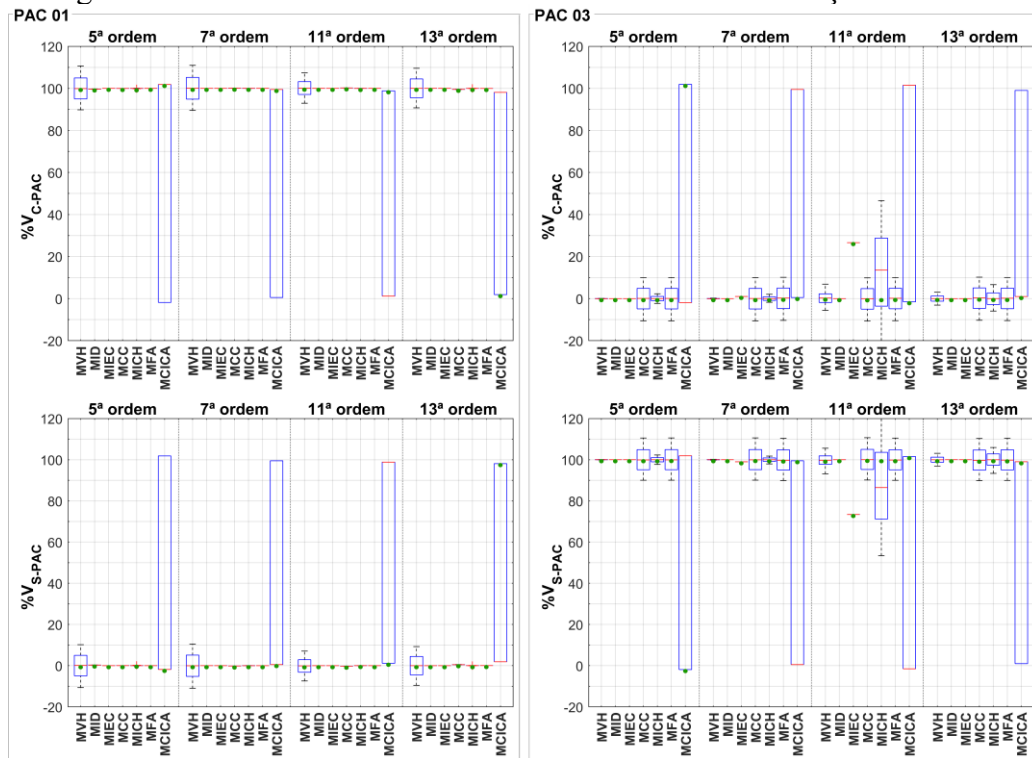
O cenário avaliado para as 6 condições de operação considerou a ocorrência de erros de magnitude e ângulo de fase simultaneamente. Os resultados do estudo de sensibilidade são mostrados nas Figura 22 a Figura 27 para cada uma das condições de operação. Nestas figuras, os pontos verdes representam o valor obtido pelos métodos sem impor nenhum erro às medições. A distribuição dos resultados de cada método HCD quando considerados os erros nos valores de tensão e corrente medidos são apresentados na forma de *boxplots*. São apresentados os percentuais de contribuição de tensão, calculados a partir das projeções dos fasores.

Figura 22 – Sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição - Caso A.



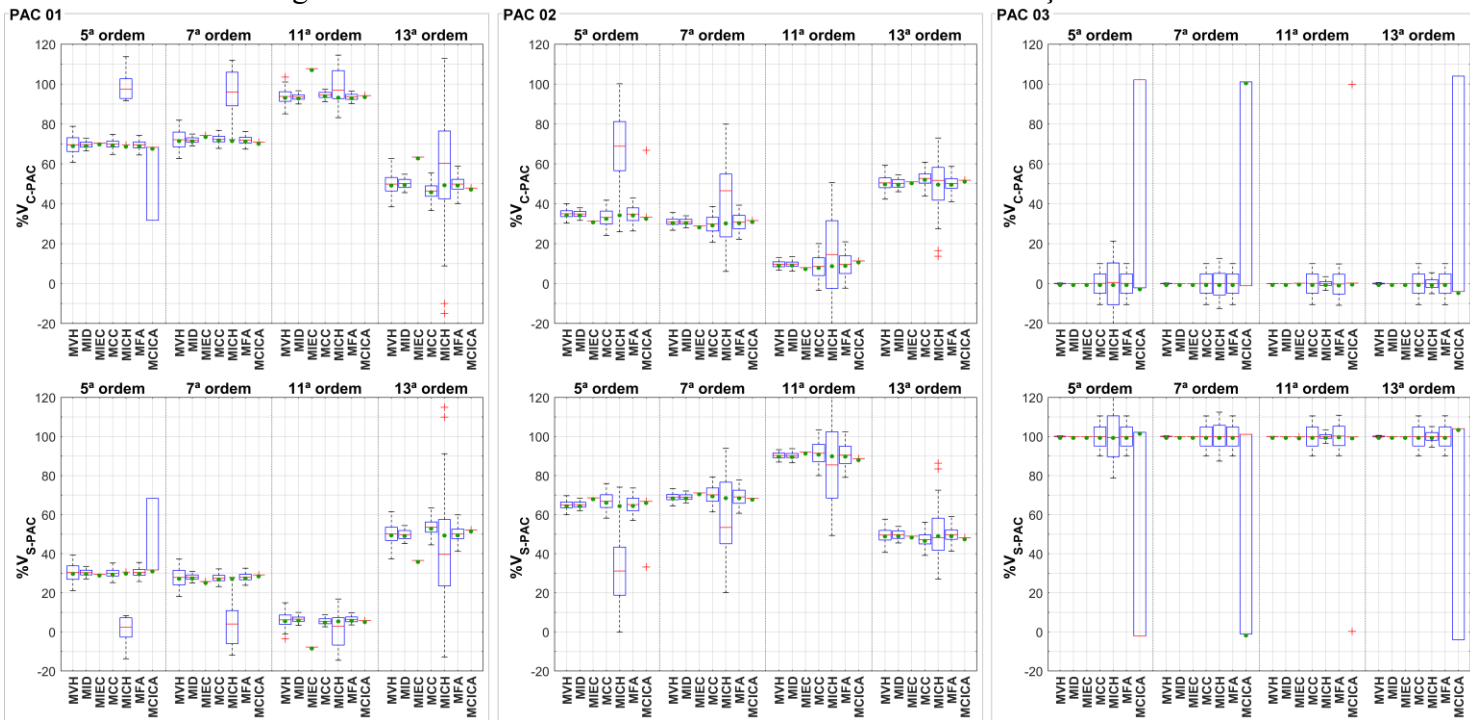
Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição - Caso B.



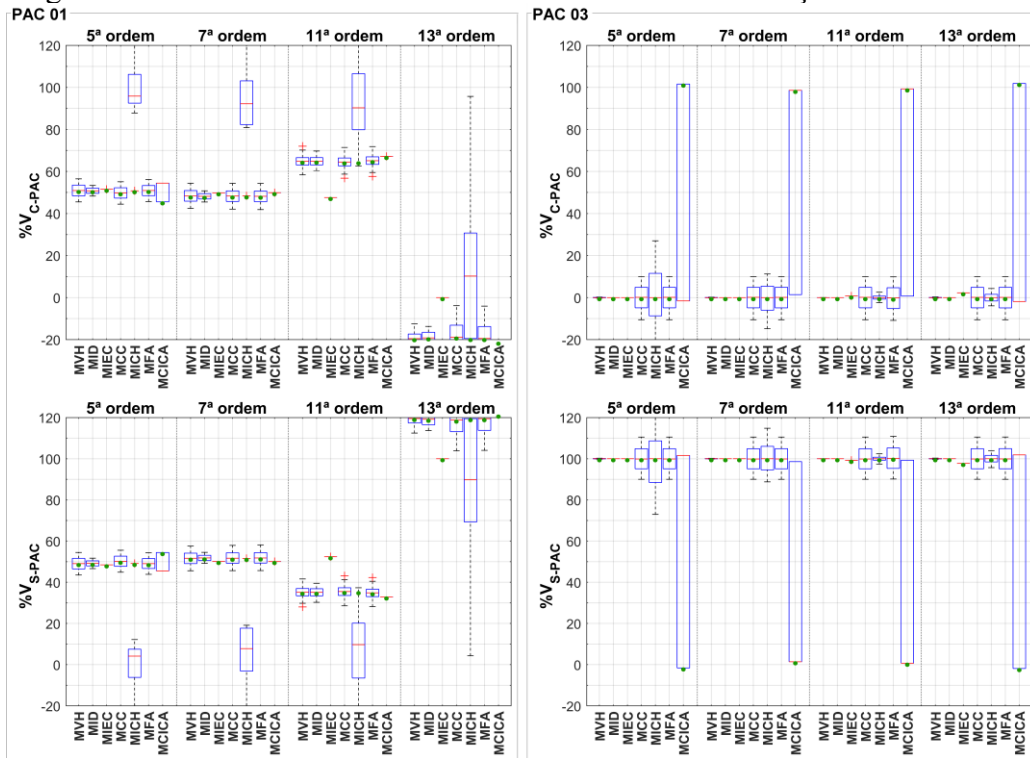
Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição - Caso C.



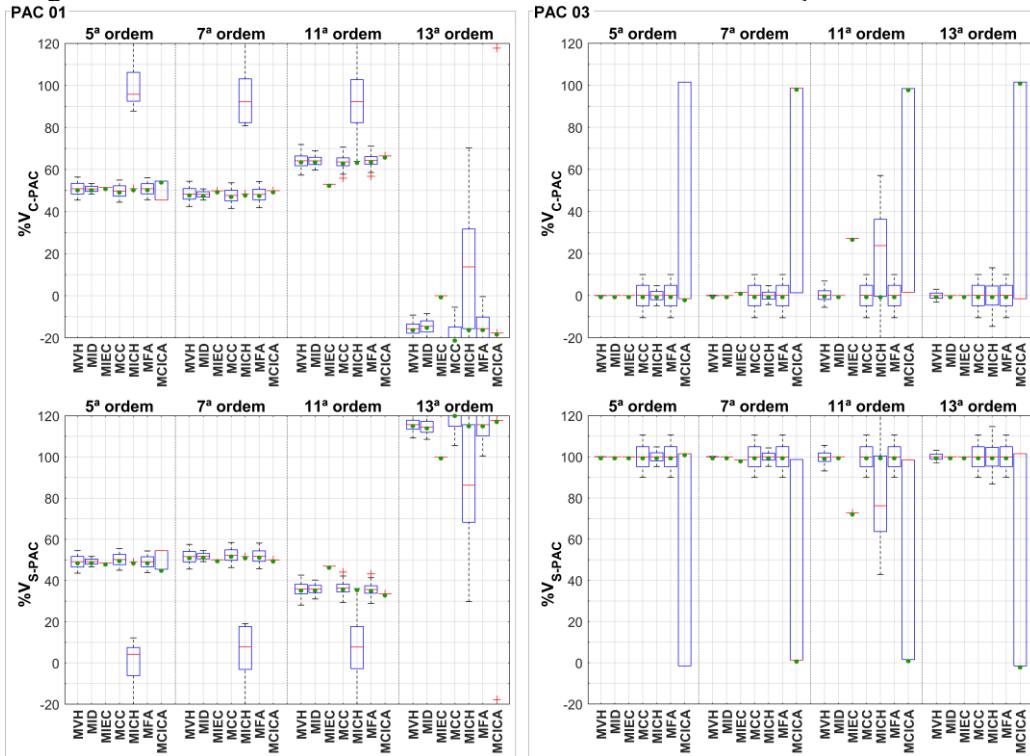
Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição - Caso A-BG.



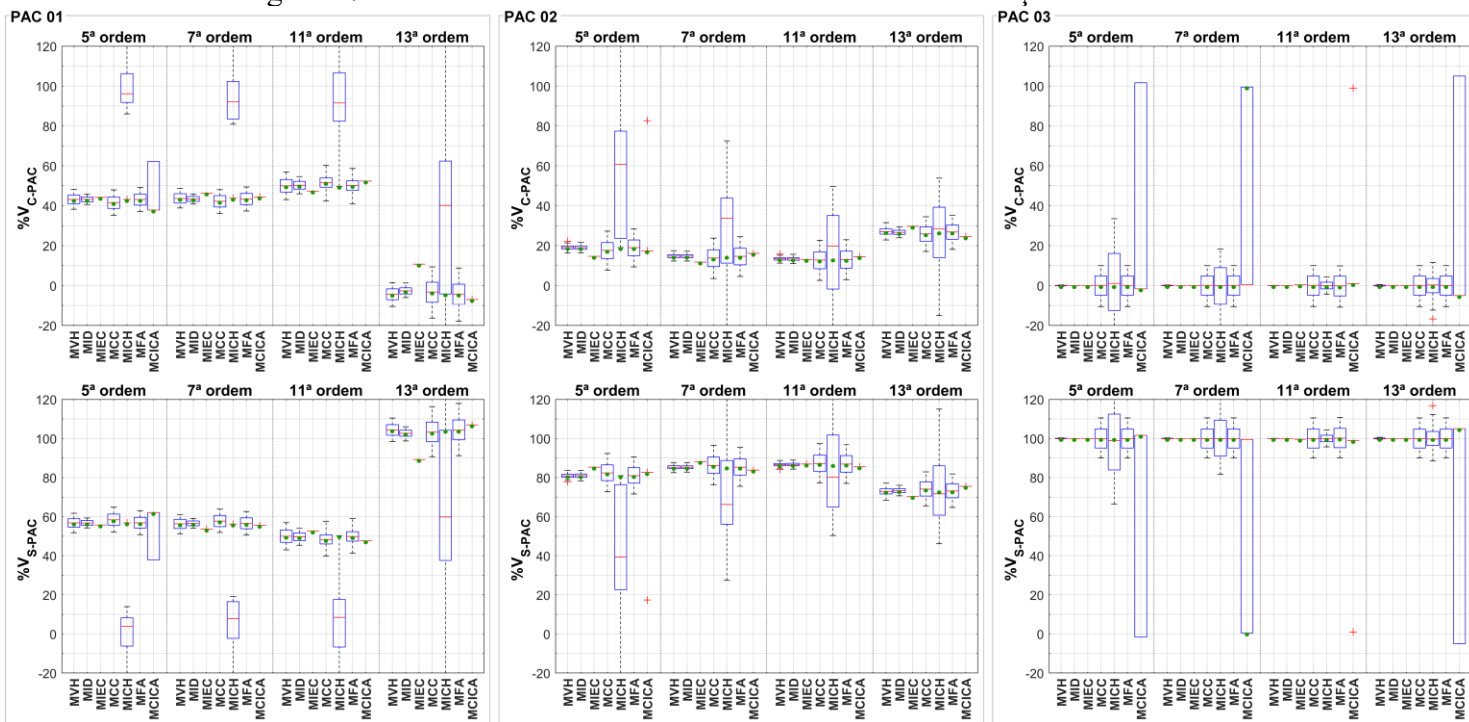
Fonte: Autoria própria.

Figura 26 – Sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição - Caso B-BG.



Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição - Caso C-BG.



Fonte: Autoria própria.

Considerando os valores dos resultados entre o 1º e o 3º quartis (percentis 25 e 75, respectivamente), que representam o intervalo interquartil e correspondem à caixa delimitada em azul, observa-se que o MVH, MID, MIEC e MFA apresentaram uma variabilidade inferior a ± 10 pontos percentuais nos resultados das contribuições em torno do valor calculado na condição sem erros (ponto verde). Isso significa que estes métodos apresentaram baixa sensibilidade a erros nas medições de tensão e corrente, pois os resultados se concentram em torno dos valores obtidos sem impor erros de medição.

O MCC e o MICH, por outro lado, apresentaram variabilidades consideráveis, podendo ser considerados métodos mais sensíveis a erros de medição. Esse resultado pode ser explicado pela quantidade de grandezas de medição (tensão e corrente) utilizadas em cada um dos métodos:

- MVH: 1 medição de tensão; 1 medição de corrente;
- MCICA: 1 medição de tensão; 1 medição de corrente;
- MIEC: 2 medições de tensão no mesmo ponto de medição;
- MID: 1 medição de tensão; 2 medições de corrente em 2 pontos de medição;
- MCC: 2 medições de tensão no mesmo ponto de medição; 3 medições de corrente em 2 pontos de medição;

- MICH: 2 medições de tensão no mesmo ponto de medição; 3 medições de corrente em 2 pontos de medição;
- MFA: 2 medições de tensão no mesmo ponto de medição; 2 medições de corrente em 2 pontos de medição.

Percebe-se, então, que o MCC e o MICH necessitam de 5 medições entre tensões e correntes, o MFA de 4, e os demais requerem 3 medições, no máximo. Com relação ao MCC, o número de medições de grandezas de corrente pode ser reduzido para 2 em 1 ponto de medição caso a impedância do capacitor seja conhecida. Essa consideração ocasiona uma menor variabilidade para os resultados do MCC, equiparando-o com o MVH, MID, MIEC e MFA.

Avaliando os resultados do MCICA de maneira mais cuidadosa, verificou-se que, em todas as situações em que havia fontes harmônicas somente em um dos sistemas equivalentes conectados ao PAC (supridor ou consumidor), o MCICA ou encontrou a contribuição correta, seja ela 0% ou 100%, a depender do PAC, ou encontrou totalmente errada, do mesmo modo como verificado nos resultados da seção 3.4. Isso ocasionou uma elevada variabilidade na análise de sensibilidade deste método. Em uma análise inicial, acredita-se que a obtenção correta ou não dos resultados de contribuição nestas situações está associada a ordem com que o MCICA encontra as impedâncias harmônicas, pois conforme explicado na seção 2.3.7, para constatar se cada impedância foi atribuída corretamente ao respectivo agente, o método verifica se a parte real encontrada para a impedância do supridor é positiva. Ademais, em geral, os estudos que tratam do MCICA consideram que existem fontes harmônicas em ambos os sistemas equivalentes conectados ao PAC.

Então, com relação à sensibilidade dos métodos a erros de medição, pode-se dizer que esta cresce à medida que se aumenta o número de grandezas de medição envolvidas. Portanto, os métodos MVH, MFA, MID e MIEC se mostraram mais robustos do que o MCC e o MICH. Ainda assim, a precisão nas medições é essencial para garantir resultados coerentes, principalmente quando o método requer um maior número de grandezas a serem medidas.

3.6 Considerações finais

A partir da avaliação computacional realizada neste capítulo, verificou-se que o MID, o MCC, o MICH e o MFA levaram a valores de contribuição bastante coerentes e convergentes com o MVH, ou seja, mesmo utilizando estratégias diferentes, eles convergiram para um resultado em comum. Portanto, visto que tais métodos apresentam meios factíveis de aplicação

em campo devido às suas características e requisitos, estes quatro métodos serão considerados, neste momento, para efeitos do cálculo do indicador de contribuição harmônica que será descrito no próximo capítulo.

Por outro lado, vislumbra-se no MCICA um potencial de aplicação prática por não necessitar da conexão e desconexão de equipamentos auxiliares no PAC, o que facilita a operacionalização da aplicação do método. Portanto, apesar desse método ter apresentado resultados discrepantes neste estudo computacional, acredita-se que ele possa ser mais bem explorado em trabalhos futuros e aprimorado para poder ser futuramente considerado no cálculo do indicador de contribuição harmônica.

4 PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DO INDICADOR DE CONTRIBUIÇÃO HARMÔNICA

4.1 Considerações iniciais

A definição de indicadores para os diversos desvios de QEE, assim como o estabelecimento de limites para os níveis desses indicadores nos sistemas elétricos, é realidade em diversos países do mundo. A justificativa, como já abordado, está nos efeitos prejudiciais que os desvios de QEE causam nos sistemas elétricos. Neste sentido, cada país possui sua própria regulamentação para as temáticas que permeiam esta área do conhecimento, muitas vezes baseada em normativas e *standards* internacionais, mas preservando suas próprias características e particularidades regionais.

Dentre os países que possuem regulamentação para desvios de QEE, encontram-se os Estados Unidos, Canadá, França, África do Sul, Peru, Argentina, Japão, China, Austrália e Brasil [118]. Ademais, os principais indicadores definidos e regulamentados nestes países são aqueles relacionados aos fenômenos das distorções harmônicas de tensão, flutuação de tensão e desequilíbrio de tensão [118].

De modo particular para o fenômeno das distorções harmônicas, percebe-se que, apesar de serem definidos indicadores e limites para os níveis de distorção nos sistemas elétricos, podem, por vezes, surgir conflitos entre os agentes envolvidos, no tocante à responsabilidade quanto à ultrapassagem destes limites. Isso se deve ao fato, já bem discutido neste documento, de que as distorções presentes nos barramentos dos sistemas elétricos são resultantes da interação das diversas fontes de injeção de harmônicos com as impedâncias equivalentes. Então, a simples medição dos indicadores referentes a estas grandezas, no PAC de conexão de um consumidor, e a constatação de violação dos limites não é suficiente para determinar se este consumidor é responsável, seja total ou parcialmente, pelo problema observado.

Justamente pela dificuldade em determinar quanto cada consumidor (ou agente) contribui para com a distorção harmônica medida no PAC, as regulamentações sobre QEE, da maioria dos países citados, não estabelecem penalidades para os casos de ultrapassagem dos limites desses indicadores. Assim, algumas impõem às concessionárias de energia a responsabilidade de compensar os consumidores, enquanto outras atribuem a responsabilidade de implementar soluções do problema para o agente [118], [119].

Nesse contexto, os avanços concretizados na proposição de métodos HCD, coerentes e factíveis de aplicação em campo, conforme demonstrado no capítulo anterior, permitem, neste trabalho de doutorado, a proposição de um indicador para definição das parcelas de contribuição harmônica dos agentes envolvidos, ao longo de um determinado período de análise.

Assim, uma metodologia proposta para definição do indicador de contribuição harmônica é detalhada neste capítulo, a qual está dividida em duas partes a) a campanha de aplicação do método HCD nos locais (PACs) em que se deseja determinar as contribuições, e b) os procedimentos para cálculo do indicador a partir dos dados de medição coletados durante a campanha de aplicação.

4.2 Campanha de aplicação do método HCD

Como a aplicação de métodos HCD requerem a medição de grandezas elétricas (tensões e corrente) e, a depender do método, a conexão de equipamentos auxiliares, é de extrema importância definir procedimentos, também chamados de protocolos de medição, para se padronizar a execução desta campanha de aplicação de métodos HCD. Nestes termos, pretende-se estabelecer os requisitos mínimos da campanha de aplicação de modo que se possam contemplar as distintas estratégias e procedimentos estabelecidos pelos métodos HCD.

Nesse sentido, a presente seção apresenta de forma detalhada todas as considerações para condução dessa primeira etapa procedimental.

4.2.1 Avaliação preliminar do conteúdo harmônico no PAC

Sabe-se que a decisão de se determinar o indicador de contribuição harmônica surgirá, na maioria das vezes, quando houver níveis de distorção harmônica no barramento de interesse próximos de ultrapassar ou, até mesmo, ultrapassando os limites estabelecidos em regulamentação. Por isso, o primeiro passo a ser dado é a realização da medição dos níveis de distorção harmônica no PAC, seguindo, nesse primeiro momento, os procedimentos estabelecidos nas regulamentações de cada país. Em geral, recomenda-se a medição de pelo menos uma semana, o que é normalmente adotado em todo o mundo. Assim, avalia-se o conteúdo espectral e os níveis de distorção no local de interesse para, então, se determinar qual ou quais ordens harmônicas serão alvo do cálculo do indicador de contribuição harmônica.

4.2.2 Escolha do método HCD

Conforme análises feitas no Capítulo 3, os métodos considerados, neste trabalho, para efeitos do cálculo do indicador de contribuição harmônica são o MID, MCC, MFA e MICH. Como já destacado, acredita-se que o MCICA possa ser mais bem explorado no futuro, bem como outros métodos HCD que se façam pertinentes.

Assim, os principais requisitos para a aplicação prática destes métodos HCD são:

- Necessidade de mudança de estado controlada (chaveamento do equipamento auxiliar);
- Medição de grandezas elétricas – tensões e correntes – nas duas condições de operação (equipamento auxiliar OFF e equipamento auxiliar ON).

No caso do MID, apesar desse método não ser originalmente definido como um método de mudança de estado, para torná-lo compatível com o indicador proposto e para realizar o cálculo do índice de dominância, verificou-se a necessidade de medir as grandezas elétricas nas duas condições de operação (FPS ON e OFF).

Ademais, cada um destes métodos HCD considera algumas premissas específicas, a saber:

- MID: o FPS deve ser dominante sobre as demais impedâncias, então o índice de dominância (ID) calculado deve ser maior que 0,8;
- MCC: BCs de diferentes capacidades podem ser mais adequados ao longo da faixa de ordens harmônicas avaliadas, justamente para que a influência do capacitor, naquela ordem, não altere as condições operacionais do sistema (impedâncias e fontes harmônicas);
- MFA: a injeção de corrente pelo FA deve garantir o isolamento harmônico, isto é, proporcionar uma corrente harmônica, no PAC, igual a zero;
- MICH: o dispositivo utilizado deve ser capaz de causar uma mudança perceptível na tensão harmônica sob avaliação, mas não deve influenciar os valores das impedâncias e das fontes harmônicas.

É válido mencionar, que caso não seja possível instalar no PAC os equipamentos auxiliares necessários, por causa do nível tensão, por exemplo, pode-se considerar a possibilidade de se empregar procedimentos para extrapolação do cálculo das contribuições harmônicas. Esses procedimentos permitem a obtenção das contribuições em determinado

barramento, a partir da aplicação do método HCD escolhido em outra barra do sistema. Os procedimentos para extrapolação para o MID, MCC e MICH são estabelecidos em [82]. Com relação ao MFA, considera-se que a operação de FAs deve ser realizada na média tensão, portanto, caso haja necessidade de determinar as contribuições em PACs de alta tensão, a referência [85] prevê a utilização dos fundamentos de circuitos quadripolos para transferir os resultados obtidos na média para a alta tensão com o mínimo de perdas de precisão. Essa seria uma forma de realizar a extrapolação dos resultados desse método em particular.

Portanto, a escolha do método está diretamente relacionada com os recursos disponíveis no local de interesse, ou com a verificação do melhor custo-benefício entre as soluções existentes. Por fim, uma última consideração para a escolha do método está relacionada à definição das ordens harmônicas a serem investigadas, o que será melhor detalhado na seção subsequente.

4.2.3 Definição das ordens harmônicas de interesse

Com relação às ordens a serem avaliadas, uma sugestão inicial é limitar as análises àquelas em que estejam ocorrendo violações dos limites de distorção de tensão, ou àquelas que estão próximas de atingi-los. Até porque níveis de distorção harmônica muito abaixo dos limites podem ocasionar inconsistências nos resultados dos métodos HCD por gerarem maiores imprecisões nas medições de tensões e correntes harmônicas. Numa vertente complementar, as frequências a serem também avaliadas seriam aquelas que, efetivamente, estivessem ocasionando anomalias operacionais em componentes ou no próprio sistema, mesmo que seus níveis se apresentem dentro dos limites estabelecidos.

Supondo que existam níveis críticos de distorção em mais de uma ordem harmônica, recomenda-se, num primeiro momento, investigar uma ordem por vez, para minimizar a influência de uma ordem harmônica na outra. No entanto, também é possível investigar mais de uma ordem simultaneamente, e isto está diretamente relacionado com o método HCD escolhido para ser aplicado e os recursos disponíveis ou com maior relação custo-benefício.

A avaliação das contribuições para mais de uma ordem harmônica de maneira simultânea é facilitada quando se têm disponíveis:

- Bancos de capacitores (MCC), pois a conexão de um capacitor irá provocar alterações em várias ordens harmônicas. Contudo, não pode-se esquecer que o BC mais adequado para uma ordem não é necessariamente o mesmo para as demais. Por isso, o uso de BCs com diferentes estágios é ainda mais recomendado;

- Filtros ativos (MFA e MICH), desde que estes tenham capacidade de injetar correntes de diferentes ordens harmônicas de forma simultânea.

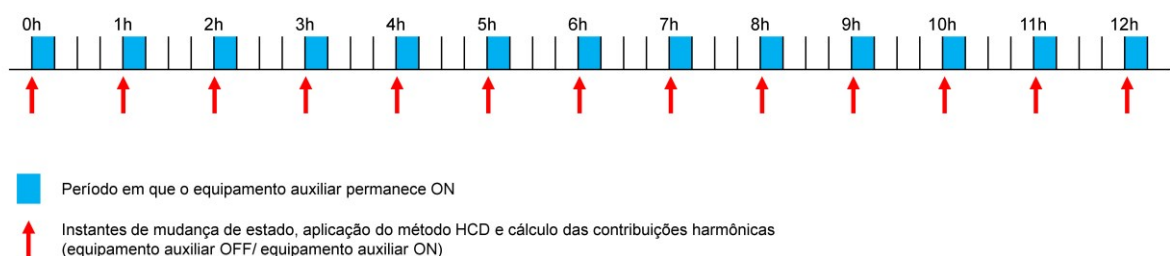
Já no caso dos filtros passivos sintonizados (MID), quando da avaliação de várias ordens harmônicas simultaneamente, se requer que exista um filtro sintonizado em cada ordem a ser avaliada. Uma alternativa é utilizar um filtro multissintonizado [120], pois esse filtro possui a frequência de sintonia variável. No entanto, nesse caso, a avaliação da contribuição harmônica ocorreria em uma ordem harmônica por vez, pois este equipamento pode ser sintonizado em uma única ordem harmônica de cada vez.

4.2.4 Intervalo entre as aplicações do método HCD

Como já bem mencionado, os métodos HCD considerados requerem medições em duas condições de operação, ou seja, com o equipamento auxiliar desligado e com ele ligado. Os instantes em que os equipamentos auxiliares são ligados, ou chaveados, são chamados de instantes de mudança de estado, e são justamente nesses instantes de mudança de estado que o método HCD é aplicado para o cálculo das contribuições harmônicas. Portanto, é indispensável definir o intervalo entre as mudanças de estado, para que, conseqüentemente, seja definido o intervalo entre as aplicações sucessivas do método HCD para obtenção dos valores das contribuições ao longo do período de análise.

Recomenda-se que o método HCD seja aplicado a cada 30 minutos ou, no máximo, a cada 1 hora, para que seja possível obter uma maior quantidade de registros dos valores de contribuição ao longo do período de análise. Para melhor visualização, um exemplo considerando o intervalo entre aplicações do método HCD de 1 hora é mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Exemplo de intervalo entre mudanças de estado para aplicação do método HCD.



Fonte: Autoria própria.

Como a aplicação dos métodos HCD considerados se fundamenta na conexão e desconexão de equipamentos nos sistemas elétricos, é necessário, em alguns casos, que essas operações sejam aprovadas pelos órgãos reguladores e/ou de operação existentes. Além disso, alguns equipamentos elétricos, como os bancos de capacitores, exigem um tempo mínimo entre desligamento e religamento que deve ser respeitado. Normalmente, este intervalo pode ser encontrado na placa do equipamento. A título de informação, o tempo mínimo entre desligamento e religamento dos bancos de capacitores *shunt*, que fazem parte da Rede Básica Brasileira, varia entre 2 e 15 minutos [121].

Para garantir que as mudanças de estado ocorram nos intervalos pré-estabelecidos, aconselha-se, ainda, que seja realizada a automatização da operação do equipamento auxiliar. Por exemplo, no caso do MCC, utilizar temporizadores para ligar e desligar o disjuntor que conecta o BC ao PAC.

4.2.5 Duração da campanha de aplicação

A prática usualmente adotada nos protocolos já estabelecidos nacional e internacionalmente [118] consiste em campanhas de medições com duração mínima de 7 dias consecutivos. Neste período, caso haja a ocorrência de perturbações, a exemplo de transitórios de manobra de equipamentos/linhas, energização de transformadores, variações de tensão de curta duração (VTCDs) ou interrupções de fornecimento, os valores obtidos devem ser expurgados e substituídos por igual número de valores resultantes de aplicações válidas. Esse mesmo período mínimo de medição de 7 dias consecutivos e o protocolo de expurgo deve ser adotado para a campanha de aplicação de métodos HCD. Então, deve-se prever alguns dias extras na duração da campanha de aplicação, para os casos de serem necessários tais expurgos.

Além desta possibilidade de expurgo, comumente utilizada, o procedimento aqui proposto para se alcançar o indicador de contribuição harmônica, conforme esmiuçado nas seções seguintes, estará sujeito a um teste de consistência dos dados medidos em que haverá possibilidade de expurgos adicionais. Diante desta realidade, sugere-se, nesta tese, que a duração da campanha de aplicação de métodos HCD seja de no mínimo de 10 dias consecutivos.

Recomenda-se, ainda, que a campanha de aplicação seja executada em um período correspondente às operações típicas dos agentes sob análise. Em casos de parques de geração eólica, por exemplo, deve-se evitar períodos do ano em que os ventos apresentem velocidades baixas. Por outro lado, pode-se considerar obter o indicador de contribuição harmônica por um

período mais longo, quando o agente sob análise possuir um ciclo típico de operação superior a 7 dias.

4.2.6 Medidores e transdutores

Para as medições das grandezas elétricas devem ser utilizados analisadores de QEE compatíveis com as exigências correlatas a equipamentos Classe A, conforme [122]. Neste íterim, estes equipamentos devem, também, seguir os procedimentos estabelecidos em [116] com relação às medições de distorções harmônicas e estarem devidamente calibrados – calibração com validade, em geral, de 2 anos.

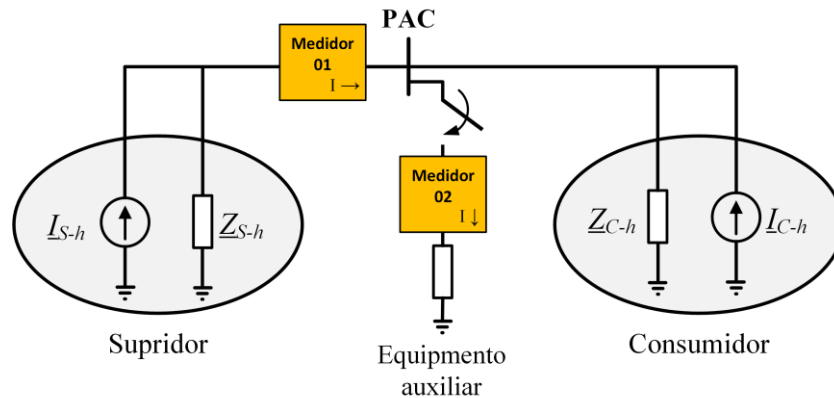
Um ponto que merece destaque é o fato das normativas [116] e [122] não incluírem procedimentos para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e corrente, embora os métodos HCD as exijam. Portanto, certos analisadores de QEE simplesmente não disponibilizam os ângulos de fase das componentes harmônicas, enquanto aqueles que fornecem tais informações o fazem com procedimentos próprios, muitas vezes não divulgados para os usuários. Isto pode levar a resultados divergentes, ao comparar os ângulos de fase entregues por analisadores de diferentes modelos e fabricantes.

Algumas pesquisas têm contemplado metodologias para medição e agregação dos ângulos, dentre as quais inclui-se a intitulada como “*prevailing harmonic phasor*” [117], [123]. Inclusive, [117] propõe a implementação da medição de ângulos de fase harmônicos em medidores de QEE, incluindo métodos para agrupar essas grandezas na frequência e posteriormente agregá-las no tempo. De qualquer maneira, enquanto a medição de ângulos harmônicos não seja exigida e padronizada nas normativas, deve-se procurar utilizar medidores comerciais que disponibilizam estas grandezas.

Como os métodos HCD estabelecidos, em geral, requerem medições de corrente em pontos diferentes, pode ser necessário utilizar mais de um medidor de QEE. Nesse contexto, como há necessidade de registros simultâneos de correntes em pontos distintos, é imprescindível que haja sincronismo entre os equipamentos de medição, ou seja, as medições devem ser realizadas com as mesmas referências de tempo e ângulos de fase. Alguns medidores de QEE possuem módulos de sincronização via GPS, para os casos em que se utiliza mais de um equipamento de medição. Outra opção interessante é a medição de sincrofasores [124], que são fasores medidos por unidades de medição fasorial (PMU) e sincronizados por satélite (GPS). A medição de sincrofasores harmônicos já está disponível em alguns modelos de analisadores de QEE.

A Figura 29 mostra um diagrama unifilar genérico da conexão dos medidores na situação de um PAC que conecta dois agentes.

Figura 29 – Exemplo de conexão de medidores de uma campanha de aplicação em um PAC que conecta dois agentes (supridor e consumidor).



Fonte: Autoria própria.

Além disso, quando é necessário utilizar transdutores de tensão, algumas precauções devem ser observadas quanto ao nível de precisão destes equipamentos, conforme estabelecido em [125]. A literatura e as experiências práticas revelam que alguns tipos de transdutores de tensão, especialmente transdutores indutivos e capacitivos, não possuem respostas lineares para todo o espectro de frequência [125], [126], [127], [128]. Então, é imprescindível o conhecimento da resposta em frequência do equipamento para eventuais correções dos valores medidos para as magnitudes e ângulos de fase. Esta é, até mesmo, uma exigência nacional quando da realização de campanhas de medição de distorção harmônica na Rede Básica [119]. Os procedimentos de ensaio para levantamento da resposta em frequência de transdutores de tensão estão estabelecidos em [125]. Por fim, deve-se utilizar transdutores de tensão a 3 elementos e conectados em estrela aterrado, para que não sejam eliminadas, eventualmente, as componentes de sequência zero das tensões.

4.2.7 Grandezas medidas e período de integralização das medições

As seguintes grandezas devem ser registradas, durante a realização da campanha de aplicação, para as três fases do sistema e por cada medidor:

- Tensão fase-neutro RMS;
- Tensão fase-neutro fundamental (amplitude e ângulo de fase);
- Tensões fase-neutro harmônicas (amplitude e ângulo de fase);

- Corrente RMS;
- Corrente fundamental (amplitude e ângulo de fase);
- Correntes harmônicas (amplitude e ângulo de fase);
- Distorção harmônica total de tensão e corrente.

Quanto às tensões e correntes harmônicas, é necessário medir todos os ângulos de fase das ordens harmônicas sob investigação. No entanto, recomenda-se, ainda, registrar as amplitudes até a 50^a ordem harmônica para efeitos de monitoramento, pois a conexão dos equipamentos auxiliares pode alterar a dinâmica de operação normal do sistema e, assim, permite-se monitorar de forma mais completa.

O período de integralização, usualmente empregado, para registro dos indicadores de QEE, quando da quantificação dos níveis das distorções harmônicas de tensão, é de 10 minutos [118]. Esta prática tem-se mostrado apropriada para as questões até então tratadas, entretanto, ao se incorporar os requisitos associados com a aplicação dos métodos HCD, principalmente no que tange à premissa de que as impedâncias e fontes harmônicas não devem se alterar significativamente durante a aplicação do método, verifica-se a necessidade de se considerar períodos de integralização mais curtos. Por isso, sugere-se que o período de integralização das medições esteja entre 1 segundo e 10 segundos, uma vez que a própria norma que rege os protocolos de medição dos analisadores de QEE prevê o período de integralização de 3 segundos (150 ciclos em 50 Hz / 180 ciclos em 60 Hz) [122]. Além disso, há analisadores comercialmente disponíveis no mercado que permitem ao usuário escolher o período de integralização a partir de 0,25 segundos.

4.3 Cálculo do indicador de contribuição harmônica

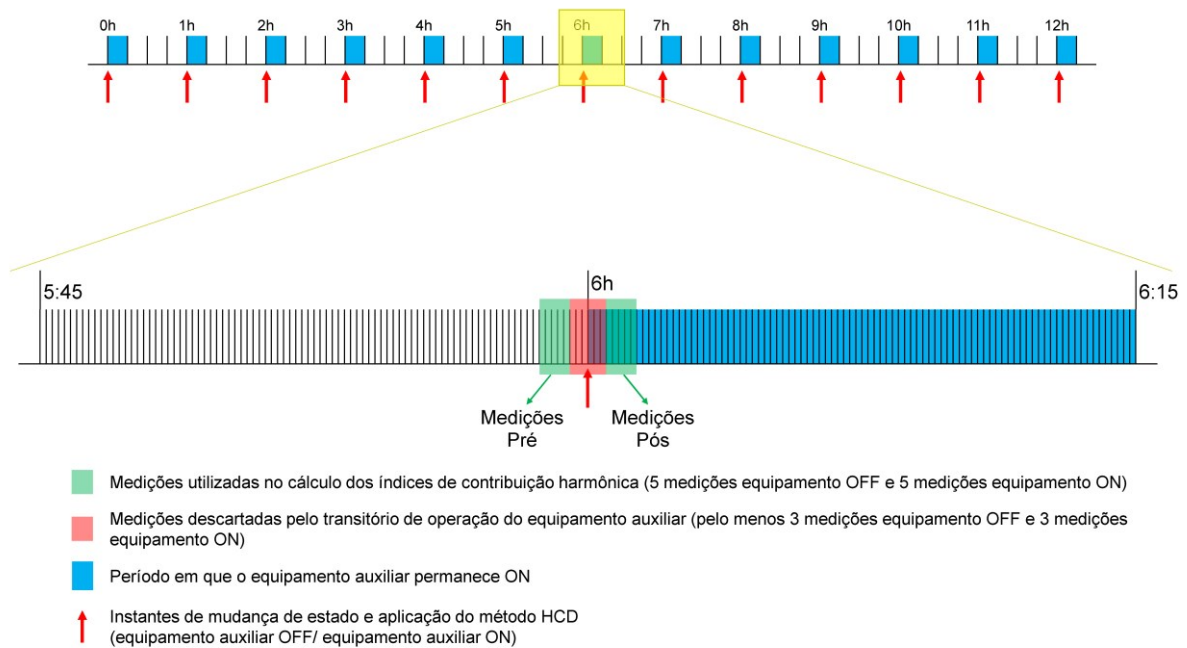
Após concluída a campanha de aplicação e armazenadas as grandezas registradas pelos medidores, parte-se para a segunda parte da implementação da metodologia. Essa está relacionada com o tratamento dos dados e cálculos para estabelecimento do valor do indicador de contribuição harmônica que representa o período analisado pela campanha de aplicação.

Mais uma vez, são apresentados os procedimentos para definir o indicador de contribuição especificamente de tensão, contudo, permanece a mesma concepção caso se deseje, em situação excepcional, calcular o indicador de contribuição harmônica de corrente.

4.3.1 Cálculo dos índices de contribuição a cada aplicação do método HCD

Para simplificar a explicação, considera-se uma campanha de aplicação realizada em um PAC que possua dois agentes, supridor e consumidor, conforme esquema de ligação dos medidores da Figura 29. O método HCD aplicado, neste exemplo, é o MID, com a 5ª ordem harmônica como ordem de interesse. A campanha de aplicação foi realizada durante 9 dias, 2 dias extras para o caso de serem necessários descartes dos dados de medição, com intervalo entre as aplicações do MID de 1 hora e com medições integralizadas a cada 10 segundos. Além disso, o FPS permaneceu ligado por 15 minutos. A Figura 30 apresenta um recorte do exemplo considerado.

Figura 30 – Exemplo de campanha de aplicação de método HCD.



Fonte: Autoria própria.

O objetivo inicial, então, é calcular o valor dos índices de contribuição harmônica de tensão a cada 1 hora, para cada uma das fases. Por isso foram geradas mudanças de estado (FPS OFF/FPS ON) com esse intervalo de tempo. Então, a cada hora, ou melhor, a cada aplicação do método HCD, os seguintes passos são considerados:

1. Desconsiderar o período transitório de operação do equipamento auxiliar

FPSs e BCs possuem transitórios de chaveamento relativamente rápidos, na ordem de milissegundos [14], e os FAs também possuem tempo de resposta em milissegundos, de acordo

com catálogos de fabricantes [129], [130], [131]. Portanto, recomenda-se descartar, pelo menos, as últimas 3 medições antes da entrada em operação do equipamento auxiliar, bem como as 3 primeiras medições pós entrada em operação do equipamento auxiliar (em vermelho na Figura 30) para garantir que o período transitório foi descartado com segurança. A quantidade de medições desconsideradas pode aumentar caso o equipamento auxiliar utilizado possua um maior tempo de resposta para atingir sua operação nominal. No entanto, também é válido lembrar que quanto menor a quantidade de medições descartadas, mais consegue-se sustentar a premissa de que as fontes de corrente e as impedâncias harmônicas permanecem inalteradas entre uma condição de operação e a outra.

2. Armazenar as medições a serem utilizadas para o cálculo do índice de contribuição

Após eliminar o período transitório, armazena-se as medições a serem utilizadas no cálculo do índice de contribuição. Para tanto, considera-se as 5 medições antes da entrada em operação do equipamento auxiliar (Medições Pré), bem como as 5 medições após a entrada em operação do equipamento auxiliar (Medições Pós). Esses conjuntos de medições estão indicados em verde na Figura 30. Esta quantidade (cinco) de Medições Pré e Pós foi considerada para verificação da integridade dos dados advindos destas medições e para avaliação da premissa estabelecida pelos métodos HCD considerados sobre a invariabilidade das fontes de corrente e impedâncias harmônicas durante a mudança de estado. Uma quantidade maior de medições poderia ser considerada, mas quanto maior o período total (5 medições de 10 seg totalizam 50 seg), maiores seriam os impactos da dinâmica de operação do sistema elétrico local sobre os parâmetros dos circuitos equivalentes dos agentes. Lembrando que as tensões e correntes devem ser armazenadas na sua forma fasorial, considerando, portanto, magnitude e ângulo de fase.

3. Calcular os índices de contribuição de tensão utilizando os conjuntos de Medições Pré e Pós

A partir do Método da Superposição (MVH), o índice de contribuição dos agentes corresponde às projeções dos fasores de contribuição sobre a tensão do PAC, ou seja, corresponde a uma grandeza medida em volts. Portanto, esta definição é adotada na metodologia aqui proposta, sendo considerada para efeito de todos os métodos HCD.

Além disso, como o nível de distorção harmônica no PAC pode e provavelmente irá variar ao longo do período da campanha de aplicação, tem-se uma melhor clareza a respeito

intensidade da contribuição dos agentes, ao longo do período de avaliação, quando se utiliza estes valores de índices de contribuição, em volts, ao invés do emprego de um valor percentual de contribuição.

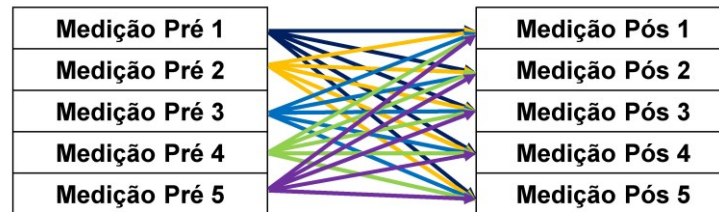
Outra observação importante está no fato da soma das projeções dos fasores resultar no módulo da tensão do PAC, ou seja, a soma dos índices de contribuição corresponde a magnitude da tensão harmônica do PAC, por isso estes podem ser facilmente relacionados com o indicador de distorção de tensão harmônica individual (DTHI). Supondo que se tem uma tensão de 5ª ordem igual a 11 V no PAC, que é equivalente, neste exemplo, a 5% de DTHI. Então, uma vez calculados os índices de contribuição, caso seja verificado, por exemplo, que o supridor contribui com 4 V, enquanto o consumidor responde por 7 V, pode-se dizer, então, que o supridor gera uma DTHI de 5ª ordem de 1,8%, enquanto o consumidor gera 3,2% de DTHI de 5ª ordem e, conseqüentemente, juntos os dois agentes provocam os 5% de DTHI.

Caso uma das projeções seja negativa, o que é possível de ocorrer, os índices de contribuição dos agentes devem ser recalculados em função da tensão do PAC e dos módulos das projeções. Isso porque, apesar de uma projeção negativa demonstrar que o agente está contribuindo para diminuir a tensão harmônica resultante no PAC, ele continua contribuindo, então o uso de valores positivos auxilia no entendimento do problema e torna mais direta a relação dos índices de contribuição de cada agente com a DTHI medida no PAC.

Isso, posto, sabe-se que os quatro métodos HCD selecionados, MID, MCC, MICH e MFA, utilizam das medições de tensão e/ou corrente, antes e após a conexão do equipamento auxiliar, para o cálculo dos fasores de contribuição de tensão dos agentes. Cada método possui as suas próprias equações, todas apresentadas no Capítulo 2, onde prevê-se a utilização de uma Medição Pré e uma Medição Pós no cálculo dos fasores de contribuição. Contudo, propõe-se aqui, como já afirmado, a utilização de 5 medições de cada condição de operação. Nesse caso, a ideia é calcular os índices de contribuição (projeção dos fasores) utilizando todas as combinações possíveis de Medições Pré e Pós, em consonância com a ilustração vista na Figura 31.

Assim, nesse estágio, obtém-se um conjunto de índices de contribuição (25 para o supridor e 25 para o consumidor) referente a cada uma das aplicações do método HCD executadas durante a campanha de aplicação.

Figura 31 – Combinações dos conjuntos de Medições Pré e Medições Pós para o cálculo dos índices de contribuição.



Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Critérios de expurgo

Agora que os conjuntos de índices de contribuição foram definidos e calculados para todas as aplicações sucessivas do método HCD, deve-se realizar os expurgos pertinentes. Basicamente, o primeiro critério de expurgo considera a ocorrência de alguma VTCD ou interrupção de fornecimento durante o registro dos conjuntos de Medição Pré e Pós. Em caso afirmativo, os respectivos conjuntos dados, das três fases, devem ser expurgados, mesmo que a ocorrência do evento seja verificada em apenas uma das fases.

Na sequência, aplica-se o segundo critério de expurgo, o qual tem relação direta com a premissa dos métodos HCD considerados de que as fontes de corrente e as impedâncias harmônicas dos agentes permanecem inalteradas antes e após a mudança de estado (ou com alteração pouco significativa). Isso pode ser verificado ao analisar-se cuidadosamente os conjuntos de índices de contribuição calculados. Se os dados de um mesmo conjunto (25 resultados) possuírem baixa variabilidade, significa que a premissa estabelecida para aplicação dos métodos HCD se sustenta. Todavia, caso seja verificada uma grande variabilidade nos resultados, isto implica que pode ter ocorrido, durante o processo de aplicação do método HCD, alguma inconformidade, devendo, assim, o conjunto de dados ser expurgado.

Para a verificação da variabilidade dos conjuntos de dados, utiliza-se o coeficiente de variação de Pearson (CV), que é representado em percentual e determinado a partir do cálculo da razão entre o desvio padrão e a média do conjunto de dados [132]. De maneira geral, resultados para o CV menores que 10% demonstram que existe baixa dispersão no conjunto de dados [132].

Portanto, deve-se calcular o CV de cada conjunto de índices de contribuição, para cada uma das fases. Caso o CV seja maior do que 10% em alguma das fases, os conjuntos de contribuições respectivos de todas as fases devem ser expurgados.

4.3.3 Aplicação do Percentil 95

Após aplicados os critérios de expurgo, o valor final do índice de contribuição harmônica dos agentes de cada uma das fases, referente a cada aplicação do método HCD ao longo da campanha de aplicação, será o resultado da média dos 25 valores de cada conjunto, ou seja, é obtido um valor de contribuição de cada agentes para cada aplicação do método HCD.

Então, como são considerados 7 dias de campanha, e nesse exemplo foram realizadas aplicações do método HCD a cada 1 hora, ao final devem ser considerados os 168 primeiros índices válidos (não expurgados) de contribuições, para cada fase do sistema, para representar todo o período da campanha de aplicação.

Como já dito, a soma dos índices de contribuição dos agentes resultará no valor da tensão, para a respectiva ordem harmônica, do PAC. Portanto, assim como já é comumente adotado para os indicadores de distorção harmônica em diversos países [118], incluindo o Brasil em nível de distribuição [89] e da rede básica [22], aplica-se aqui o conceito do Percentil 95 sobre os 168 resultados dos índices de contribuição harmônica, de forma independente em cada uma das fases.

A aplicação do Percentil 95 tem como objetivo remover valores extremos de tensão harmônica medidos no PAC, em cada fase do sistema. Portanto, descarta-se os 5% dos índices de contribuição que representarem os maiores valores para a tensão harmônica no PAC, em cada uma das fases de forma individual. Isso resultará no descarte de 9 resultados por fase.

4.3.4 Determinação do indicador

Finalmente, esta última etapa contempla os cálculos para se definir um valor único para o indicador de contribuição harmônica representativo da operação dos agentes durante do período de avaliação da campanha de aplicação, considerando os 159 resultados obtidos para cada fase durante a campanha de aplicação.

A ideia é ponderar os índices de contribuição em função da violação do limite do indicador de distorção de tensão harmônica individual (DTHI). Caso no momento daquela aplicação do método HCD, o DTHI esteja ultrapassando o limite estabelecido em norma, os índices de contribuição dos agentes são multiplicados por um fator de severidade de violação (FSV).

Ressalta-se que a definição do valor do FSV a ser considerado, para efeitos do cálculo do indicador de contribuição único, deverá ser feita a partir de estudos futuros e discussões em

conjunto com os agentes do setor. Entretanto, para uma análise inicial, três diferentes valores para o FSV serão avaliados em um estudo de caso real no capítulo subsequentes desta tese, a saber:

- FSV = 1: nessa situação não há ponderação sobre a violação do DTHI.
- FSV = 5: quando da violação do limite do indicador DTHI, os índices de contribuição dos agentes têm um peso 5 vezes maior na definição do indicador.
- FSV = 10: considerando um fator mais severo, as violações do limite do DTHI têm um peso 10 vezes maior na definição do indicador.

Assim, os indicadores de contribuição harmônica, para a ordem harmônica h , referentes ao supridor e consumidor, são calculados a partir das equações (40) e (41), respectivamente.

$$CH_{S-h} = \left(\frac{ICHT_{S-A} + ICHT_{S-B} + ICHT_{S-C}}{(ICHT_{S-A} + ICHT_{S-B} + ICHT_{S-C}) + (ICHT_{C-A} + ICHT_{C-B} + ICHT_{C-C})} \right) \cdot 100\% \quad (40)$$

$$CH_{C-h} = \left(\frac{ICHT_{C-A} + ICHT_{C-B} + ICHT_{C-C}}{(ICHT_{S-A} + ICHT_{S-B} + ICHT_{S-C}) + (ICHT_{C-A} + ICHT_{C-B} + ICHT_{C-C})} \right) \cdot 100\% \quad (41)$$

Sendo:

$$ICHT_{S-A} = \sum_{i=1}^N (ICH_{S-A_i} \cdot FS_A) \quad \text{e} \quad ICHT_{C-A} = \sum_{i=1}^N (ICH_{C-A_i} \cdot FS_A) \quad (42)$$

$$ICHT_{S-B} = \sum_{i=1}^N (ICH_{S-B_i} \cdot FS_B) \quad \text{e} \quad ICHT_{C-B} = \sum_{i=1}^N (ICH_{C-B_i} \cdot FS_B) \quad (43)$$

$$ICHT_{S-C} = \sum_{i=1}^N (ICH_{S-C_i} \cdot FS_C) \quad \text{e} \quad ICHT_{C-C} = \sum_{i=1}^N (ICH_{C-C_i} \cdot FS_C) \quad (44)$$

$$FS_A = \begin{cases} FSV, & \text{se } DTHI_{A_i} > DTHI_{LIMITE} \\ 1, & \text{se } DTHI_{A_i} \leq DTHI_{LIMITE} \end{cases} \quad (45)$$

$$FS_B = \begin{cases} FSV, & \text{se } DTHI_{B_i} > DTHI_{LIMITE} \\ 1, & \text{se } DTHI_{B_i} \leq DTHI_{LIMITE} \end{cases} \quad (46)$$

$$FS_C = \begin{cases} FSV, & \text{se } DTHI_{C_i} > DTHI_{LIMITE} \\ 1, & \text{se } DTHI_{C_i} \leq DTHI_{LIMITE} \end{cases} \quad (47)$$

Onde:

- N é o total de resultados para os índices de contribuição referentes as aplicações sucessivas do método HCD (159 para o exemplo apresentado).
- ICH_{S-A_i} corresponde ao índice de contribuição harmônica da fase A do supridor para o resultado i . O mesmo é válido para as outras fases, substituindo A por B e C.
- ICH_{C-A_i} corresponde ao índice de contribuição harmônica da fase A do consumidor para o resultado i . O mesmo é válido para as outras fases, substituindo A por B e C.

Assim, o indicador de contribuição harmônica (CH) dos agentes é obtido utilizando os índices de contribuição das três fases, ou seja, tem-se um indicador único para o sistema trifásico pois, em geral, as estratégias empregadas para a mitigação das distorções harmônicas são instaladas de maneira trifásica.

4.4 Considerações finais

É importante destacar que todo o processo apresentado neste capítulo, sobre a metodologia proposta para definição do indicador único de contribuição harmônica, foi concebido de modo genérico para contemplar outros métodos HCD que sejam considerados apropriados para este objetivo.

Assim, a partir da proposição desse indicador, pôde-se contribuir com a discussão e o aprimoramento de normativas, *standards* e regulamentações sobre QEE nacionais e internacionais, e de modo especial, com a questão das ações a serem tomadas quando da violação dos limites de distorção harmônica em sistemas elétricos.

5 DETERMINAÇÃO DO INDICADOR DE CONTRIBUIÇÃO HARMÔNICA DE AGENTES CONECTADOS A UM PAC REAL: ESTUDO DE CASO

5.1 Considerações iniciais

Este capítulo avalia a aplicação da metodologia proposta em um sistema real. Assim, realiza-se um estudo de caso no ponto de conexão de uma unidade consumidora com a rede de uma concessionária de distribuição brasileira. O objetivo do capítulo é demonstrar e avaliar um exemplo real de utilização do indicador proposto com vistas ao estabelecimento da contribuição harmônica de agentes conectados ao sistema elétrico, contemplando tanto a condução de uma campanha de aplicação de um método HCD no local escolhido, quanto a implementação do cálculo do indicador de contribuição harmônicas dos agentes ali conectados ao PAC.

5.2 Campanha de aplicação do método HCD

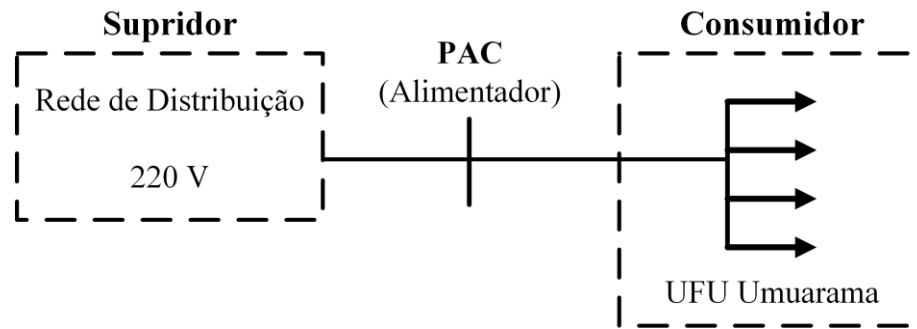
A campanha de aplicação do método HCD, aqui apresentada, foi realizada em 2021, no âmbito do projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) ANEEL intitulado “Método Modificado da Superposição para o Compartilhamento de Responsabilidades Harmônicas”.

5.2.1 Local de avaliação

O PAC selecionado, para avaliação do indicador de contribuição harmônica, é o ponto de conexão de um conjunto de prédios do Campus Umuarama da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), localizado em Uberlândia/MG. Estes prédios são supridos em baixa tensão pela rede de distribuição local, como visto na Figura 32.

Entre os prédios supridos pelo alimentador, destaca-se um anfiteatro, um banco, blocos de laboratórios dos cursos de odontologia, biomédicas e agronomia, setores administrativos e iluminação externa do campus. Nessa avaliação, a rede de distribuição é tratada como sistema supridor, enquanto as cargas dos prédios da UFU Campus Umuarama fazem parte do circuito equivalente do consumidor.

Figura 32 – Diagrama unifilar simplificado do local de avaliação.

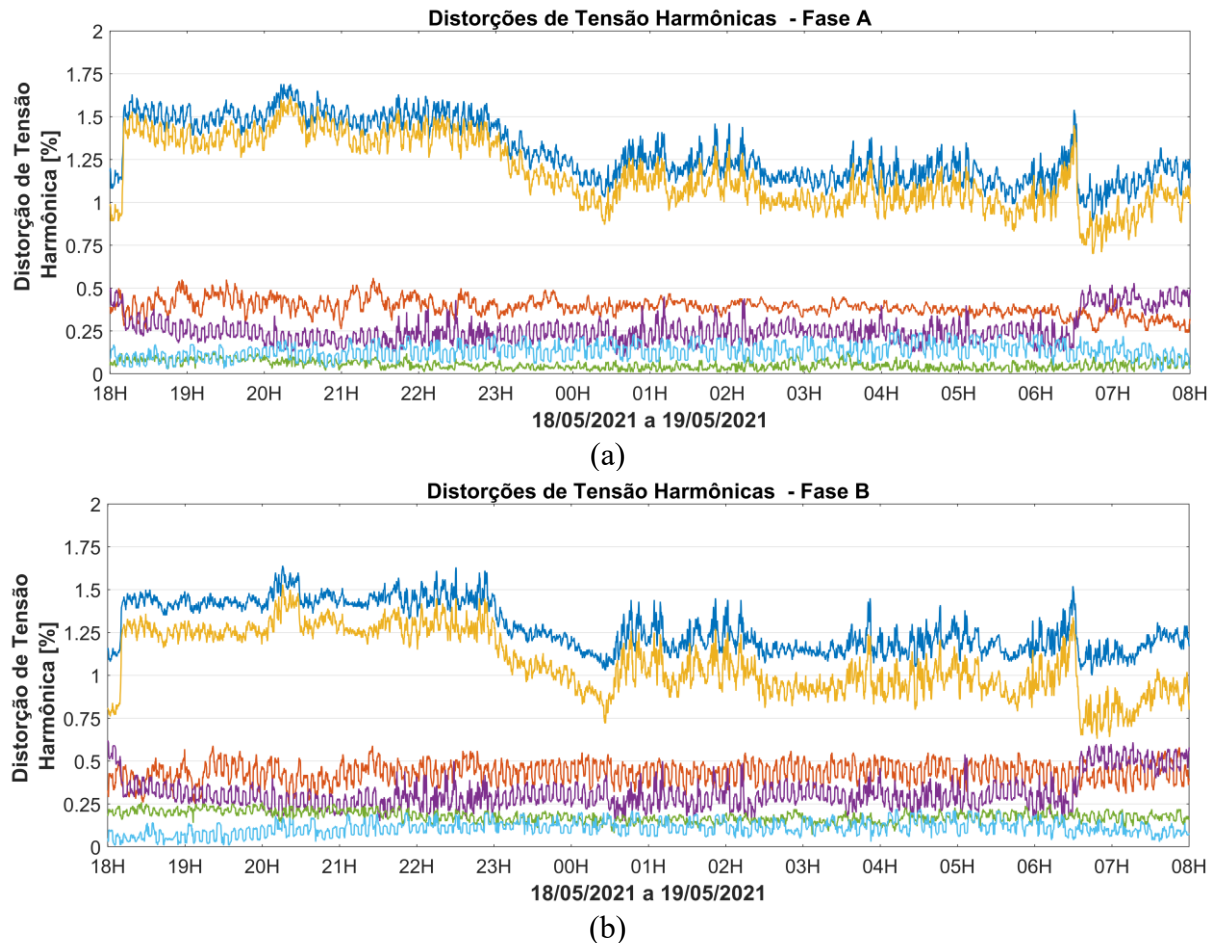


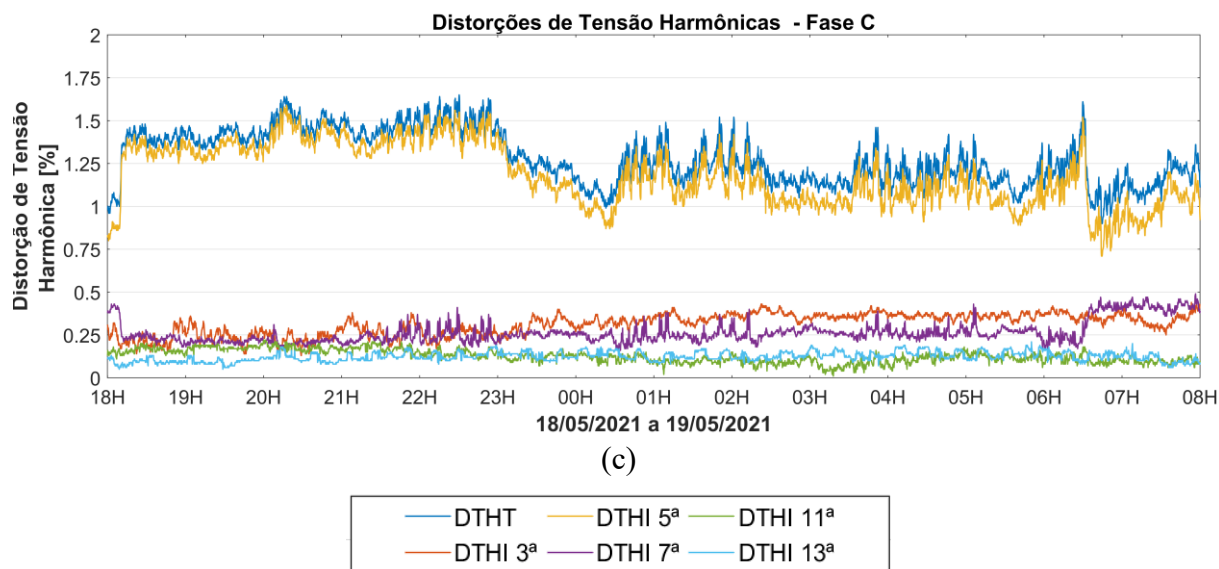
Fonte: Autoria própria.

5.2.2 Avaliação preliminar do conteúdo harmônico no PAC

Utilizou-se um medidor modelo Fluke 435 II [133] para monitoramento das distorções harmônicas de tensão individuais e total do PAC, durante 12 horas. As $DTHI_{hs}$ de maiores magnitudes e a DTHT são apresentadas na Figura 33, ao longo do período de medição preliminar.

Figura 33 – Avaliação prévia dos níveis de distorção harmônica no PAC. (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C.





Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na Figura 33, a distorção de tensão harmônica total no PAC é predominantemente composta pelas harmônicas de 5ª ordem, em todas as três fases.

5.2.3 Definição das ordens harmônicas de interesse

A partir dos resultados obtidos na avaliação preliminar, escolheu-se a ordem harmônica com maior nível de distorção, a 5ª ordem, para implementar a metodologia do indicador proposto. Trata-se, de fato, de uma aplicação que tem a finalidade de testar, a partir de dados reais, a lógica de cálculo do indicador aqui, nesta tese, concebido.

5.2.4 Escolha do método HCD

Dentre os métodos HCD elencados para a campanha de aplicação, o escolhido foi o MID, Método da Impedância Dominante. Essa escolha foi embasada na consistente fundamentação teórica do método, nos resultados obtidos por ele nos estudos computacionais, bem como no critério de melhor custo-benefício, pois essa campanha de aplicação foi realizada durante a execução de um Projeto de P&D da ANEEL que tinha, dentre os seus objetivos, a aplicação do MID em campo.

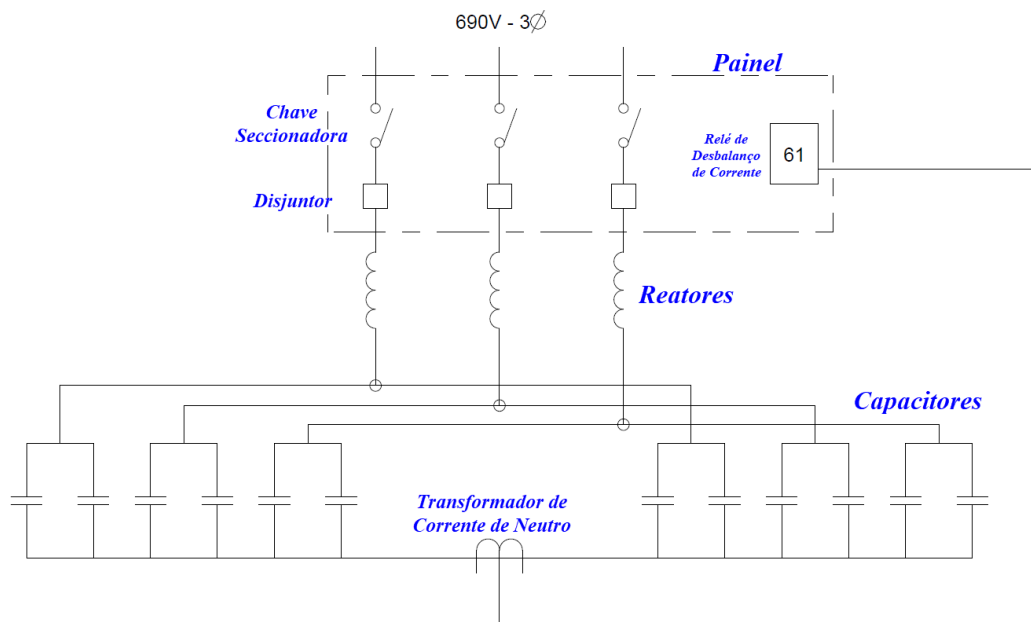
Para viabilizar a aplicação do método, foi desenvolvido no âmbito de tal Projeto de P&D um equipamento auxiliar chamado filtro multissintonizado, sendo fabricadas duas unidades do equipamento, uma para aplicações em MT (34,5 kV) e outra para aplicações em BT (até 690 V).

O filtro multissintonizado de baixa tensão (FMBT), utilizado na presente aplicação, é descrito a seguir.

5.2.4.1 Filtro multissintonizado de baixa tensão (FMBT)

O FMBT foi desenvolvido para facilitar a aplicação do MID em mais de uma ordem harmônica. O equipamento foi projetado e fabricado pela empresa *GE Grid Solutions*. A Figura 34 ilustra o diagrama trifilar do FMBT evidenciando seus principais elementos constituintes.

Figura 34 – Diagrama trifilar do FMBT.



Fonte: Autoria própria.

Embora o FMBT tenha sido projetado para operar em um sistema de 690 V, este pode ser perfeitamente utilizado em sistemas com níveis de tensão inferiores ao especificado. O FMBT é basicamente um filtro harmônico sintonizado em uma frequência, composto, como visto na Figura 34, de capacitores em série com indutores (reatores). No entanto, a frequência de sintonia pode ser escolhida a partir da mudança de TAPs pré-estabelecidos que produzem variações das indutâncias dos reatores que o compõem. Esta unidade do FMBT foi projetada para possibilitar sintonia na 3ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas. O equipamento ainda possui um painel de comando e proteção, que conta com relé de proteção, disjuntor, chave seccionadora, contadores e circuitos de comando e sinalização.

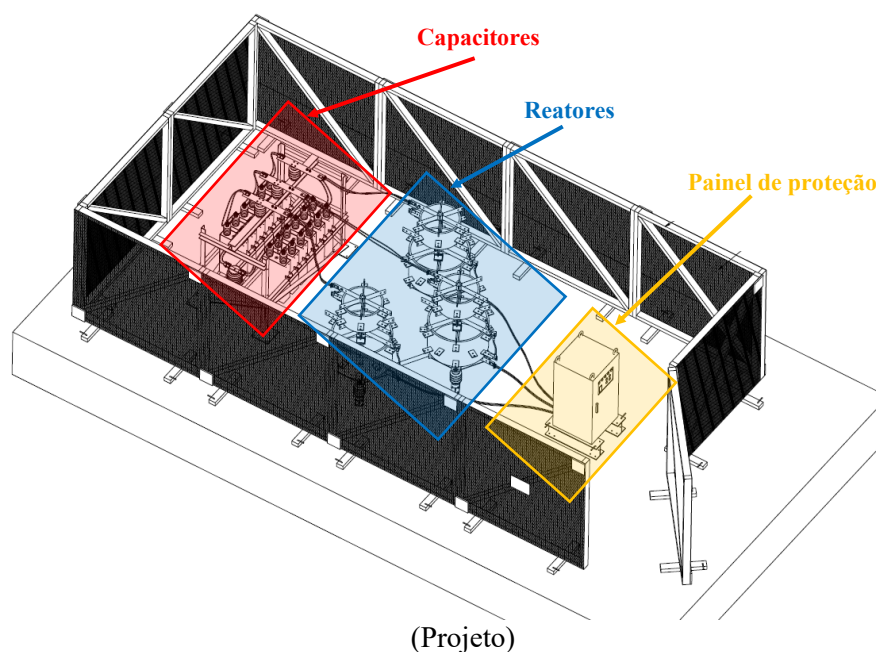
As características gerais do FMBT são sumarizadas na Tabela 13, enquanto a Figura 35 apresenta uma vista em perspectiva do projeto do equipamento e uma foto da unidade fabricada e instalada em campo.

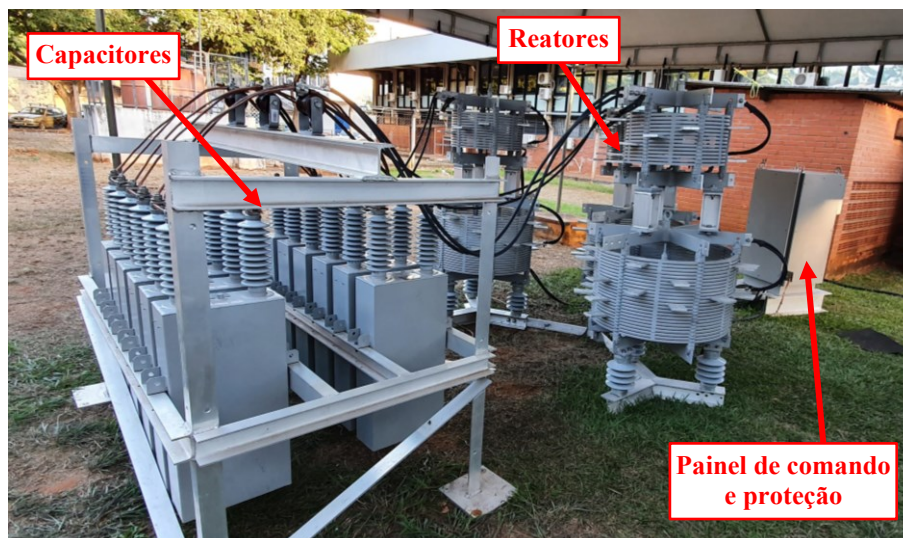
Tabela 13 – Dados gerais do FMBT.

Parâmetros	Valores e Características (Operação em 220 V)
Frequência de sintonia – FH3(Hz)	180
Potência efetiva (kVAr) / Corrente efetiva (A) – FH3	40,7 / 106,8
Indutância nominal do reator – FH3 (mH)	0,40
Frequência de sintonia – FH5(Hz)	300
Potência efetiva (kVAr) / Corrente efetiva (A) – FH5	37,6 / 98,7
Indutância nominal do reator – FH5 (mH)	0,14
Frequência de sintonia – FH7(Hz)	420
Potência efetiva (kVAr) / Corrente efetiva (A) – FH7	36,6 / 96,1
Indutância nominal do reator – FH7 (mH)	0,07
Capacitância nominal de cada unidade capacitiva (μ F)	493,41 ($\pm 2\%$)
Configuração de unidades capacitivas por fase	Paralelo = 2+2
Capacitância nominal (μ F)	1973,64 ($\pm 3\%$)
Quantidade de unidade capacitivas	12 unidades/banco
Tipo de ligação do banco de capacitores	Dupla estrela isolada
Frequência (Hz) / Fases	60 / 3
NI (kV)	20/60
Tempo mínimo entre desligamento e religamento	10 minutos
Tempo para tensão residual atingir 50 V	5 minutos

Fonte: Autoria própria.

Figura 35 – FMBT.





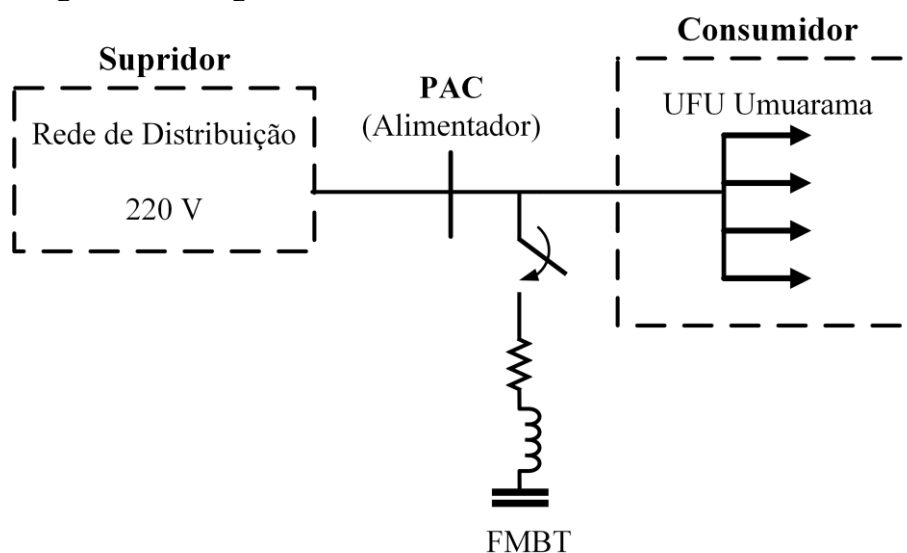
(Foto)

Fonte: Autoria própria.

5.2.4.2 Conexão do FMBT

Conectou-se o FMBT no barramento principal do quadro geral de baixa tensão (QGBT) que distribui os circuitos para os prédios do Campus UFU Umuarama, conforme mostra a Figura 36, já que este corresponde ao PAC onde deseja-se determinar as contribuições entre as partes envolvidas.

Figura 36 – Diagrama unifilar da rede e local de conexão do FMBT.



Fonte: Autoria própria.

Então, realizou-se ensaios testando diferentes combinações de TAPs dos reatores para sintonizar o FMBT na 5ª ordem harmônica com menor dessintonia possível. A Tabela 14 apresenta as frequências de sintonia alcançadas para cada fase.

Tabela 14 – Sintonias do FMBT para a 5ª ordem harmônica.

FMBT sintonizado na 5ª ordem (300 Hz)	Frequência de Sintonia		
	Fase A	Fase B	Fase C
	301,8 Hz	300,0 Hz	300,6 Hz

Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos para as sintonias do FMBT encontram-se muito próximos daqueles teoricamente projetados, em concordância com a premissa estabelecida de que a dessintonia do FMBT fosse a mais próxima de zero possível.

5.2.5 Intervalo entre as aplicações do método HCD

Definiu-se o intervalo entre as aplicações do MID como sendo 1 hora. Além disso, para garantir a operação padronizada do equipamento nos intervalos estabelecidos, utilizou-se uma automatização disponível no painel de operação do filtro, com o auxílio de temporizadores, para ligar e desligar o disjuntor que conecta o FMBT ao QGBT durante todo o período da campanha de aplicação.

5.2.6 Duração da campanha de aplicação

A campanha de aplicação foi realizada ao longo de 10 dias. Definiu-se um período mais longo do que o mínimo estabelecido (7 dias), dada a possibilidade de se realizar expurgos dos dados de medição, conforme pressuposto levantado no capítulo anterior.

5.2.7 Medidores e transdutores

Foram utilizados medidores de qualidade da energia elétrica modelo 435 série II do fabricante Fluke [133]. Na Tabela 15 são especificadas as principais características operacionais deste equipamento.

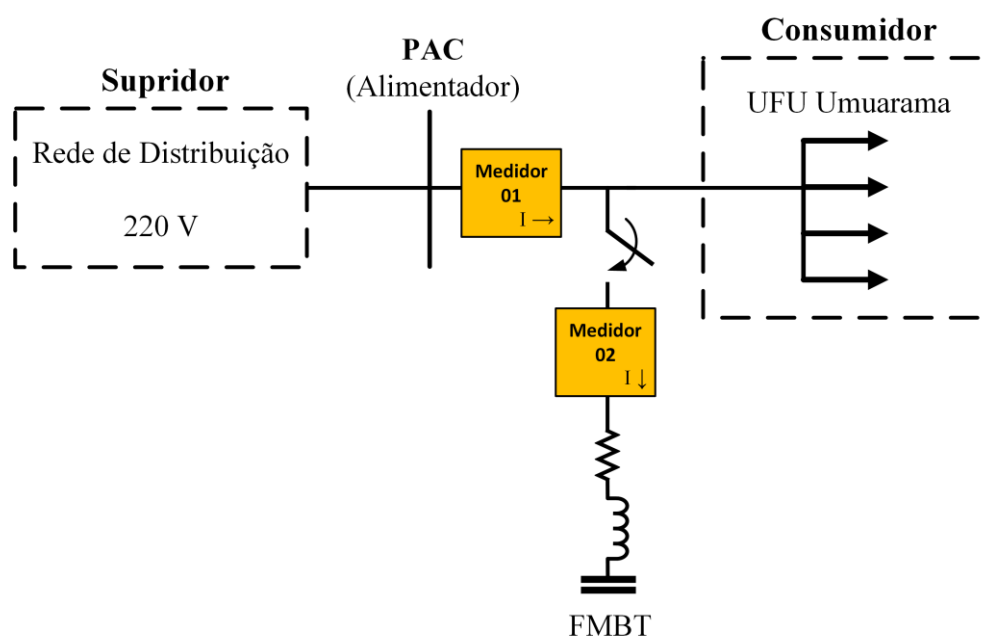
Tabela 15 – Características dos medidores de QEE Fluke 435 série II.

Modelo:	Fluke 435 II
Descrição:	Analisador de Energia e de Qualidade de Energia de Trifásico.
Atribuições:	
<ul style="list-style-type: none"> • Atendimento aos requisitos para classificação como equipamento de Classe A; • Medição de tensões trifásicas, com 5 ponteiras considerando o neutro e o terra, com medição de tensão de até 1000 V (fase-neutro); • Medição de correntes trifásicas e de neutro (4 canais de medição) via anéis flexíveis de medição de corrente AC de até 6000 A RMS, de baixo erro; • Equipamento portátil para uso em campo, com possibilidade de autonomia de energia; • Dispositivo com memória para armazenamento de longos períodos de medição; • Conformidade com a IEC 61000-4-30 e a IEC 61000-4-7; • Possibilidade de escolha do intervalo de integralização das medições: 0,25 seg, 0,5 seg, 1 seg, 3 seg, 5 seg, 10 seg, 30 seg, 1 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 hora ou 2 horas; • Medição de ângulos de fase harmônicos; • Módulo GPS430 capaz de realizar sincronização de tempo, de baixo erro, via comunicação GPS. 	

Fonte: Adaptado de [133].

Foram utilizados dois medidores distintos: o Medidor 01, para registro das tensões e correntes referentes ao PAC, e o Medidor 02, para registro da corrente do FMBT. Assim, a Figura 37 exibe o diagrama de conexão dos medidores, enquanto a Figura 38 mostra o posicionamento dos medidores em cada um dos locais estabelecidos no diagrama.

Figura 37 – Diagrama de conexão dos medidores de QEE.



Fonte: Autoria própria.

Figura 38 – Alocação dos medidores de QEE em campo.



Fonte: Autoria própria.

Nessa campanha de aplicação não foi necessário utilizar transdutores de tensão pois o PAC está na baixa tensão (220 V), permanecendo dentro dos limites de suportabilidade dos medidores tanto para as tensões quanto para as correntes.

Além disso, como foram utilizados dois equipamentos de medição, antes do início da campanha, os relógios dos medidores foram sincronizados por intermédio dos módulos GPS 430-II [134]. A sincronização dos medidores teve o objetivo de assegurar que as medições de todos os instrumentos ocorreriam de forma simultânea, garantindo a correta aplicação do método HCD, conforme já preconizado no momento de definição dos critérios mínimos para aplicação da metodologia proposta.

5.2.8 Grandezas medidas e período de integralização das medições

Com relação às grandezas registradas, foi estabelecido um mesmo registrador “logger” para os 2 medidores, o qual compreendeu as seguintes grandezas para as três fases do sistema:

- Módulos da tensão (fase-neutro) e corrente RMS;
- Módulo e ângulo da tensão fundamental (fase-neutro);

- Módulo e ângulo da corrente fundamental;
- Distorção harmônica total de tensão e de corrente;
- Módulo das tensões e correntes harmônicas (em percentual da fundamental) para a 5ª ordem harmônica;
- Ângulos das tensões e correntes harmônicas (em relação a própria ordem) para a 5ª ordem harmônica.

No que tange ao período de integralização das medições, adotou-se o período de 10 segundos. Isso significa que, a cada 10 segundos, o medidor armazenava na memória as grandezas selecionadas no “*logger*” de medição.

5.3 Cálculo do indicador de contribuição harmônica

Após a condução da campanha de aplicação, as grandezas registradas pelos medidores foram armazenadas em arquivos do tipo *.txt*. Então, desenvolveu-se um *script* no *software* MATLAB para realizar a leitura dos dados de medição e executar o cálculo do indicador de contribuição harmônica conforme os passos apresentados no Capítulo 4. Os resultados obtidos, nas principais etapas do *script*, são apresentados nas subseções a seguir para demonstrar a sequência lógica de obtenção do valor final do indicador de contribuição harmônica proposto.

5.3.1 Cálculo dos índices de contribuição a cada aplicação do método HCD

Os passos implementados no *script*, referentes a essa etapa, foram os seguintes:

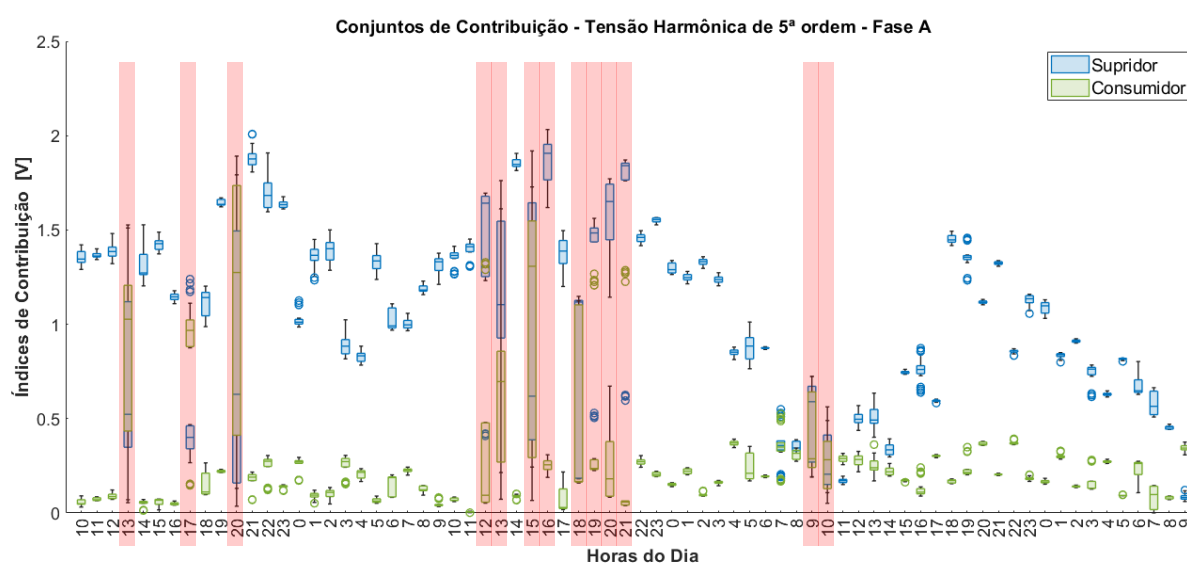
1. Leitura e tratamento das grandezas registradas pelos medidores. Nesse caso, as grandezas de tensão e corrente foram armazenadas na sua forma complexa (magnitude e ângulo de fase).
2. Identificação dos instantes de mudança de estado, isto é, quando o FMBT passava do estado OFF para ON, em cada fase.
3. Descarte do período transitório de operação do FMBT. Foram descartadas, conforme previamente definido, 3 medições antes e 3 medições após a entrada em operação do FMBT.
4. Armazenamento das 5 medições antes da entrada em operação do FMBT (Medições Pré) e das 5 medições após a entrada em operação do FMBT (Medições Pós). Excetuando, evidentemente, o período transitório descartado.

5. Verificação da consistência dos dados em virtude da ocorrência de VTCDs, interrupções ou outros. Neste caso avaliado, não foi observada qualquer ocorrência de eventos desta natureza e, conseqüentemente, não foram necessários expurgos neste tocante.
6. Cálculo dos índices de contribuição de tensão utilizando os conjuntos de Medições Pré e Pós.

Os índices de contribuição são calculados a partir das projeções dos fasores de contribuição sobre a tensão harmônica do PAC, utilizando-se, para tanto, todas as combinações possíveis de Medições Pré e Medições Pós (5 cada). Por isso, obteve-se 25 resultados de índices de contribuição dos agentes para cada aplicação sucessiva do MID, durante o período dos 10 dias de realização da campanha de aplicação.

Para ilustrar, a Figura 39 mostra o resultado obtido nesse passo, para a Fase A nos 3 primeiros dias da campanha de aplicação. Cada conjunto de índices de contribuição dos agentes supridor e consumidor é representado por um *boxplot* para visualização da distribuição dos resultados. Percebe-se que, em alguns dos momentos de aplicação do MID, os conjuntos de resultados apresentaram uma grande dispersão ou possuíram valores discrepantes (*outliers*) (destacados em vermelho na Figura 39).

Figura 39 – Conjuntos de índice de contribuição de 5ª ordem (Fase A) para os 3 primeiros dias da campanha de aplicação.



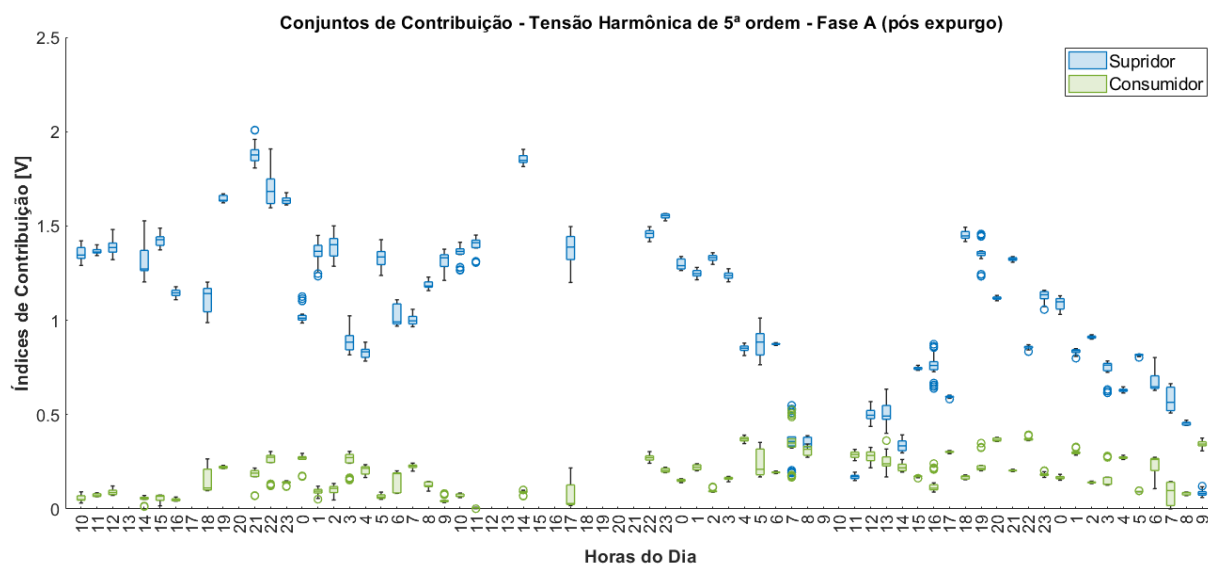
Fonte: Autoria própria.

Essa grande variabilidade nos resultados dos índices de contribuição pode significar que um ou mais parâmetros dos circuitos equivalentes dos agentes variou durante a coleta das 5 Medições Pré e/ou Pós. Por isso, o passo a seguir é importante para remover tais situações, uma vez que elas não estariam respeitando uma das premissas fundamentais dos métodos HCD selecionados.

Passos implementados no *script* (continuação):

7. Expurgos dos conjuntos de índice de contribuição com $CV > 10\%$. Estabeleceu-se o limite do coeficiente de variação em 10% para eliminar os conjuntos com maiores dispersões nos resultados e garantir, então, que nenhum parâmetro dos circuitos equivalentes dos agentes tenha tido variações significativas durante a coleta das 5 Medições Pré e/ou Pós. Assim, é mostrado, na Figura 40, o mesmo período da Figura 39, agora após a eliminação dos conjuntos de índices de contribuição que apresentaram $CV > 10\%$.

Figura 40 – Conjuntos de índice de contribuição de 5ª ordem (Fase A) para os 3 primeiros dias da campanha de aplicação – após expurgos de $CV > 10\%$.

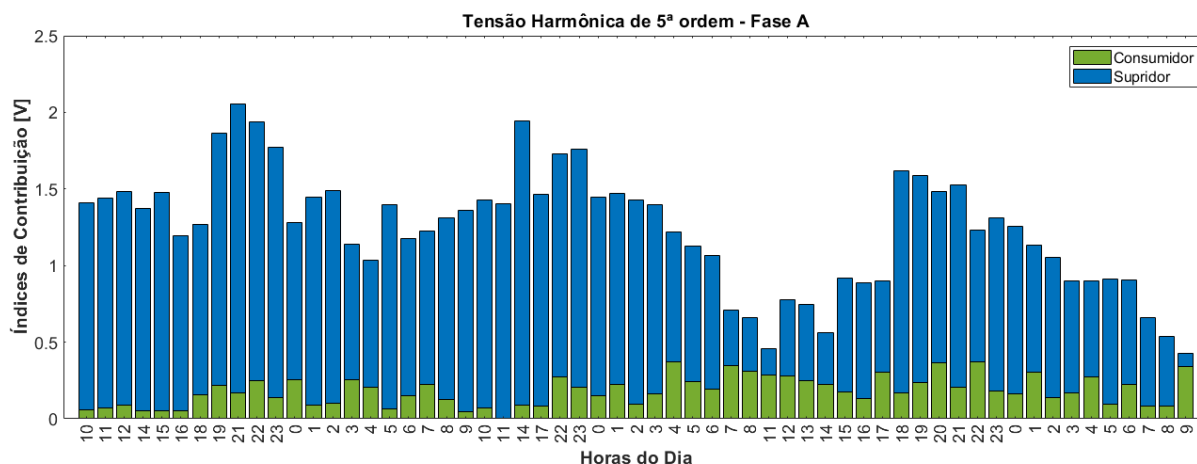


Fonte: Autoria própria.

8. Cálculo do valor final do índice de contribuição pela média dos resultados dos conjuntos. Para o recorte dos 3 primeiros dias da campanha de aplicação, o resultado dos índices de contribuição harmônica de 5ª ordem (Fase A), referente a cada aplicação do MID, está mostrado na Figura 41. Vale lembrar que a soma dos índices de contribuição dos agentes é equivalente à tensão harmônica verificada no PAC,

ou seja, ao indicador de distorção de tensão harmônica individual (DTHI) medido no PAC.

Figura 41 – Índices de contribuição harmônica de tensão de 5ª ordem dos agentes (Fase A) para os 3 primeiros dias da campanha de aplicação.



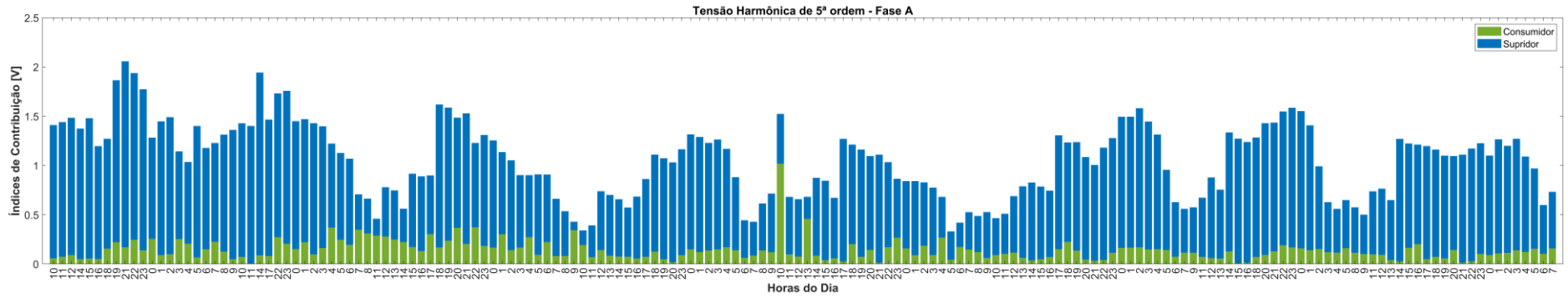
Fonte: Autoria própria.

O processo mostrado, até esse momento, foi executado para todo o período de realização da campanha de aplicação, nesse caso, os 10 dias. Contudo, após a realização dos expurgos, deve-se limitar os resultados na quantidade de aplicações do método HCD que compreendem a duração equivalente mínima de 7 dias. Então, como foram realizadas aplicações do MID a cada 1 hora, ao considerar 7 dias, isto resultará em 168 índices de contribuições harmônicas, por fase. Portanto, são considerados os 168 primeiros índices de contribuições harmônicas obtidos para cada fase para representar todo o período da campanha de aplicação. Nestes termos, a Figura 42 apresenta o resultado completo dos índices de contribuição obtidos durante a execução desta campanha de aplicação, para as três fases.

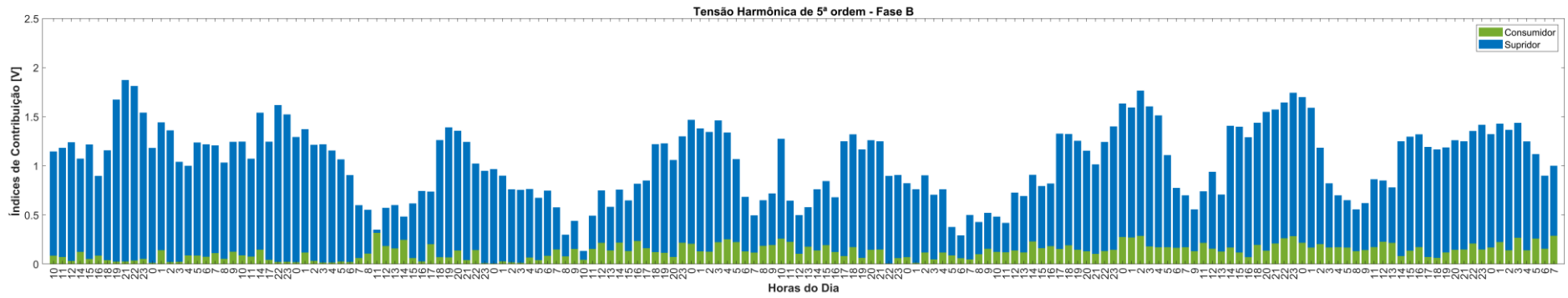
Passos implementados no *script* (continuação):

9. Aplicação do Percentil 95. A aplicação do Percentil 95, nos resultados mostrados na Figura 42, implicará em descartar, em cada uma das fases de forma independente, os 9 resultados que apresentaram os maiores valores para a tensão harmônica no PAC (DTHI). Assim sendo, a Figura 43 apresenta os resultados dos índices de contribuição da campanha de aplicação após a aplicação do Percentil 95.

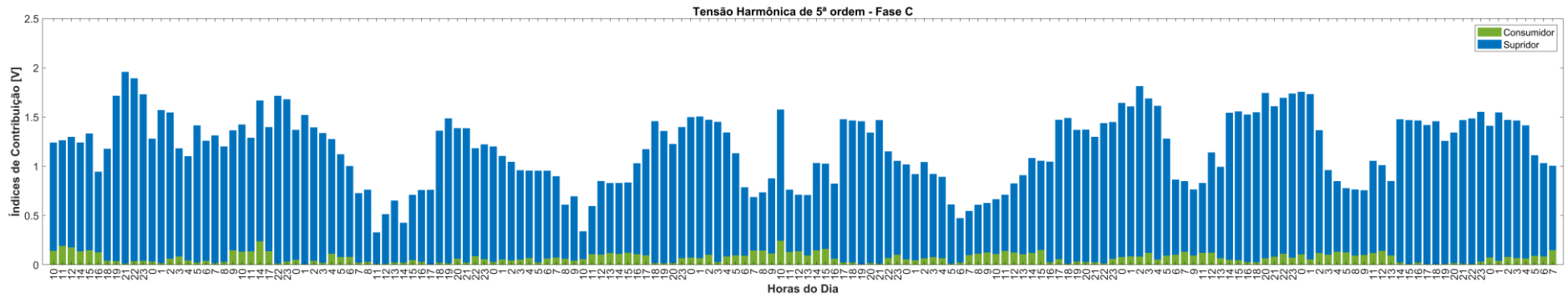
Figura 42 – Índices de contribuição harmônica de tensão de 5ª ordem dos agentes para a campanha de aplicação de 7 dias. (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C.



(a)



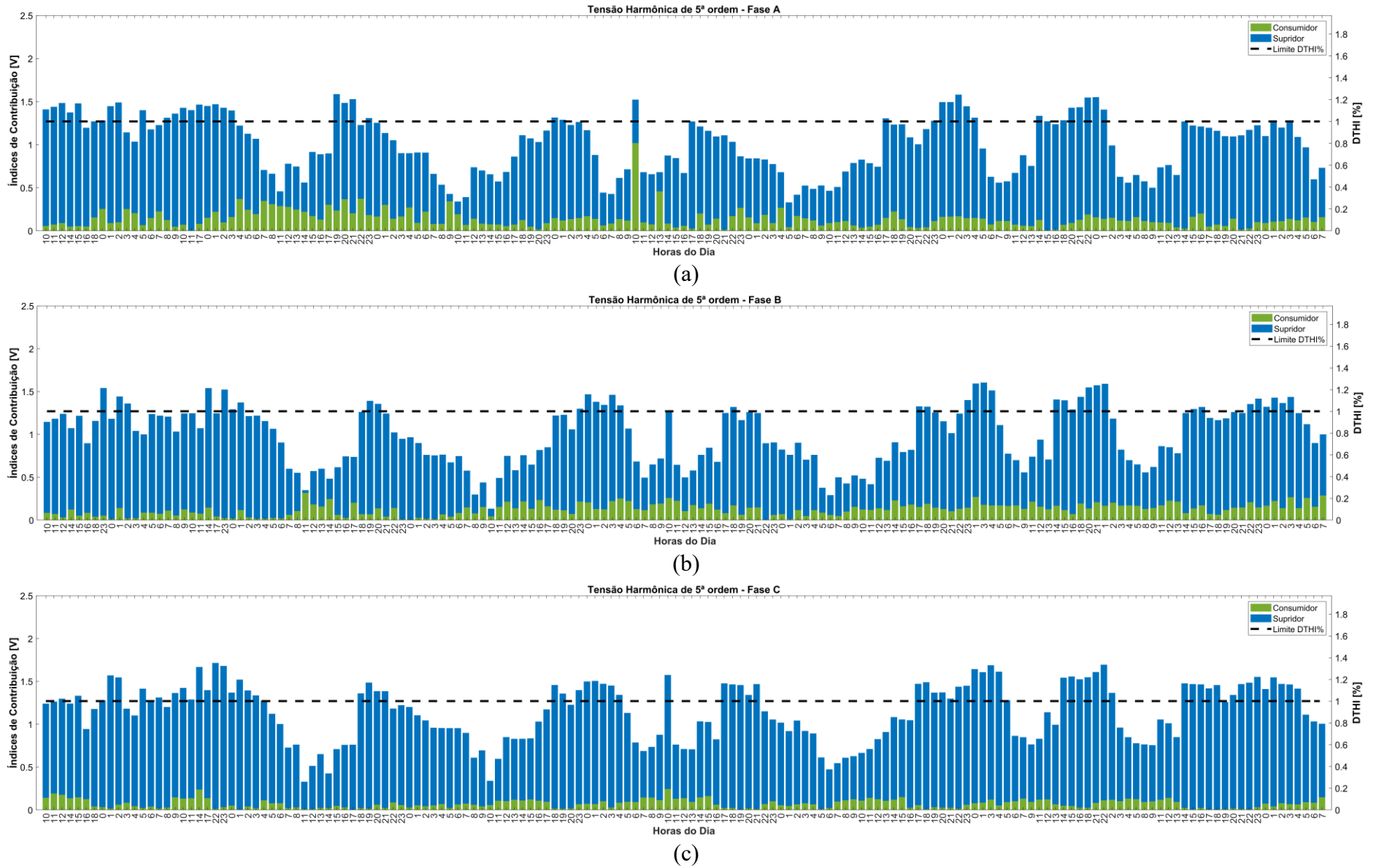
(b)



(c)

Fonte: Autoria própria.

Figura 43 – Índices de contribuição harmônica de tensão de 5ª ordem dos agentes para a campanha de aplicação de 7 dias. (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C – Após aplicação do Percentil 95.



Fonte: Autoria própria.

5.3.2 Determinação do indicador

Como dito, tem-se na Figura 43 o resultado completo das aplicações sucessivas do MID, durante o período da campanha de aplicação, bem como o valor do limite do indicador DTHI para a ordem harmônica avaliada. Para a situação sob análise, definiu-se o limite do indicador DTHI de 5ª ordem como um valor fictício de 1%, somente para que seja possível demonstrar a utilização dos fatores de severidade no cálculo do indicador de contribuição harmônica, já que na condição avaliada os níveis harmônicos permaneceram abaixo dos limites estabelecidos pela regulamentação brasileira.

Neste momento, é possível efetuar o cálculo do indicador de contribuição harmônica dos agentes, utilizando as equações (40) e (41). Finalmente, a Tabela 16 apresenta os resultados calculados para os indicadores de contribuição dos agentes supridor e consumidor considerando as três possibilidades discutidas para o fator de severidade de violação.

Tabela 16 – Indicadores de contribuição harmônica.

Indicador	FSV = 1	FSV = 5	FSV = 10
CH_S-5h	89,09%	91,13%	91,69%
CH_C-5h	10,91%	8,87%	8,31%

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos na Figura 43 e na Tabela 16, pode-se afirmar:

- Ao se observar a Figura 43, verifica-se que a tensão harmônica de 5ª ordem ($DTHI_{5h}$) apresentou um valor variável ao longo de todo o período de avaliação da campanha de aplicação. Pode-se atestar que essa variação se deve, justamente, ao perfil de operação dos diversos equipamentos não lineares que estão conectados aos sistemas supridor e consumidor, bem como a eventuais variações das impedâncias equivalentes dos sistemas envolvidos.
- Nesta situação encontrada, percebe-se que a maior parte da tensão harmônica do PAC é composta pela contribuição do sistema supridor, isto é, da rede da concessionária. No entanto, a magnitude dos índices de contribuição do supridor apresentou uma grande variação durante a duração da campanha de aplicação. O consumidor, por outro lado, contribuiu com uma porção bem menor de tensão harmônica, e possuiu um perfil mais constante ao longo de todo o período da campanha de aplicação.

- Os resultados dos indicadores destacados na Tabela 16 demonstram que, de uma forma geral, o supridor (CH_S) contribuiu com cerca de 90% e o consumidor (CH_C) com 10% para a distorção de tensão no PAC de 5ª ordem harmônica.
- Apesar de terem sido consideradas três distintas condições de fatores de severidade, aplicados quando da violação dos limites de distorção harmônica individuais estabelecidos, nota-se que os resultados não tiveram, neste estudo de caso, grandes variações em termos de apontamento dos percentuais de contribuição harmônica.

5.4 Considerações finais

Este capítulo descreveu de maneira detalhada todas as etapas envolvidas na execução de um exemplo real de determinação do indicador proposto com vistas ao estabelecimento da contribuição harmônica de agentes conectados a sistemas elétricos. Para tanto, conduziu-se uma campanha de aplicação de um método HCD no local escolhido e, posteriormente, se implementou o cálculo do indicador de contribuição harmônicas dos agentes ali conectados ao PAC.

Assim, tornou-se possível a análise de desempenho da metodologia ora concebida para definição desse indicador que, a partir de um valor único, representa as parcelas de contribuição dos agentes conectados ao PAC, mesmo considerando-se a dinâmica de operação dos sistemas elétricos e as variações nos indicadores de distorção harmônica ao longo do período de análise.

Por fim, vale ressaltar que, embora o indicador tenha sido calculado em um PAC que possui apenas dois agentes (supridor e consumidor), a metodologia proposta neste trabalho de doutorado também se aplica às situações de múltiplos agentes conectados a um PAC.

6 CONCLUSÕES

Reconhecendo a relevância do tema da determinação das contribuições harmônicas, essa tese de doutorado teve como objetivo principal contribuir com as discussões e propor diretrizes acerca do estabelecimento de um indicador para definição das parcelas de contribuição harmônica de distintos agentes do sistema elétrico, considerando os métodos HCD existentes adequados para aplicação prática e a dinâmica de operação dos sistemas elétricos de potência.

Nesse sentido, no Capítulo 2 buscou-se apresentar o estado da arte da temática central tratada e detalhar os principais métodos HCD cuidadosamente selecionados para aprofundar os estudos sobre a problemática estabelecida. Em seguida, no Capítulo 3, realizou-se a análise de desempenho computacional de tais métodos, comparando e discutindo os resultados obtidos por eles, de maneira padronizada e em condições de operação variadas, por meio do sistema teste IEEE-BTS-HCD. A vantagem de avaliar o desempenho de métodos HCD empregando um sistema teste padrão está em se estabelecer um meio facilitador para a comparação de procedimentos distintos desenvolvidos por diferentes pesquisadores, ampliando a abrangência dos estudos dessa linha de pesquisa. O Capítulo 3 também envolveu uma análise de sensibilidade dos métodos HCD a erros de medição, o que é de extrema importância já que os métodos são aplicados em campo.

Concluiu-se, a partir das análises realizadas no Capítulo 3, que os métodos factíveis de aplicação em campo que proporcionaram desempenho mais convergente e coerentes foram o MID, MCC, MFA e MICH. Por isso, estes quatro métodos foram utilizados como balizados da concepção da metodologia proposta nesta tese para a determinação do indicador de contribuição harmônica. Assim, o Capítulo 4 compreendeu o detalhamento da metodologia proposta para definição do indicador de contribuição harmônica em sistemas elétricos de potência, considerando o embasamento teórico e as particularidades deste tipo de implementação prática. A metodologia proposta encontrou-se dividida em duas partes, sendo a primeira o estabelecimento de um protocolo de campanha de medição para aplicação de métodos HCD nos locais (PACs) em que se deseja determinar a contribuição harmônica, e a segunda a definição do indicador de contribuição único, a partir do tratamento estatístico e cálculos utilizando dos dados de medição coletados pela campanha de aplicação.

Por fim, o Capítulo 5 abrangeu a aplicação da metodologia proposta em um ponto de conexão de uma unidade consumidora com uma rede de distribuição. O objetivo do capítulo foi demonstrar um exemplo real de utilização do indicador proposto com vistas ao estabelecimento da contribuição harmônica de agentes conectados a um sistema elétrico. Para tanto, conduziu-

se uma campanha de aplicação em campo do MID e, posteriormente, se implementou o cálculo do indicador de contribuição harmônica dos agentes conectados ao PAC avaliado, como estudo de caso real.

Assim, a metodologia ora concebida para definição do indicador de contribuição harmônica possibilitou definir um valor único que representa as parcelas de contribuição dos agentes conectados a um dado PAC, mesmo considerando-se a dinâmica de operação do sistema elétrico e as variações nos indicadores de distorção harmônica ao longo do período de análise. Ademais, a metodologia de cálculo do indicador de contribuição harmônica foi aplicada em uma situação real, demonstrando sua viabilidade. Portanto, todos os objetivos propostos nesta tese de doutorado foram alcançados.

Ainda, a partir da proposição desse indicador, pôde-se contribuir com a discussão e o aprimoramento de normativas, *standards* e regulamentações sobre QEE nacionais e internacionais. Mais especificamente, espera-se colaborar com a questão das ações a serem tomadas quando da violação dos limites de distorção harmônica em sistemas elétricos e, conseqüentemente, pela obtenção de um parâmetro justo e embasado em critérios técnicos científicos para dirimir o problema correlato ao apontamento dos percentuais de contribuição de cada agente para com as distorções harmônicas presentes em um barramento do sistema elétrico.

Não obstante aos desenvolvimentos apresentados e dos resultados obtidos, os seguintes tópicos podem ser elencados como merecedores de pesquisas futuras:

- Aprimoramento do script desenvolvido para criação e registro de um software capaz de calcular, a partir dos dados coletados durante uma campanha de aplicação do método HCD, o indicador de contribuição harmônica dos agentes.
- Realização de estudos aprofundados e discussões em conjunto com os agentes do setor para definição do melhor valor a ser adotado para o fator de severidade de violação (FSV) no cálculo do indicador de contribuição.
- Organização de um workshop, ou simpósio, para realização de uma ampla discussão entre o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Sociedade Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE), o CIGRE, entre outros agentes do setor, para apresentar a proposição do indicador de contribuição harmônica, fomentar a discussão e aprimorar a proposta de criação desse indicador.

- Aprofundamento dos estudos sobre o MCICA para avaliar a sua utilização no cálculo do indicador de contribuição harmônica, pelo seu potencial de facilitar a operacionalização da campanha de aplicação.
- Após a definição do indicador em conjunto com os agentes do setor elétrico, sugere-se a realização de campanhas de aplicação em PACs com diferentes características (nível de tensão, nível de curto-circuito, tipos de agentes conectados, quantidade de agentes conectados, entre outros), considerando os demais métodos HCD selecionados, para avaliar a metodologia proposta para determinação do indicador de contribuição harmônica de uma forma mais abrangente.
- A partir de alinhamentos conjuntos com os agentes do setor no estabelecimento do indicador de contribuição harmônica, uma segunda discussão está em como utilizar esse indicador no âmbito da regulamentação da QEE, a exemplo da divisão dos custos do equipamento de mitigação de harmônicos entre os agentes ou da penalização financeira dos agentes poluidores.

REFERÊNCIAS

- [1] I. N. Santos and A. C. dos Santos, “Uma forma de onda cada vez mais distorcida,” *O setor Elétrico*, vol. Edição 153, 2018.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [3] J. C. Gómez and M. M. Morcos, “Impact of EV battery chargers on the power quality of distribution systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 975–981, 2003. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.813873>
- [4] Y. Fan *et al.*, “Harmonic feature of 27.5 kV traction power system in a Chinese high-speed railway,” *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 12, no. 4, pp. 369–379, Dec. 2022. <https://doi.org/10.1049/els2.12062>
- [5] Y. Hua and A. T. Johns, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*. London: Institution of Engineering & Technology, 1999.
- [6] K. R. Padiyar, *HVDC Power Transmission Systems: Technology and System Interactions*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1990.
- [7] Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Sistema Interligado Nacional - Rede de Operação - Horizonte 2024.” Accessed: Mar. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>
- [8] X. Qin, P. Zeng, Q. Zhou, Q. Dai, and J. Chen, “Study on the development and reliability of HVDC transmission systems in China,” in *2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Wollongong, 2016. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2016.7753862>
- [9] Empresa de Pesquisa Energética, “Plano Decenal de Expansão de Energia 2031,” Rio de Janeiro, Brasil, 2022.
- [10] International Energy Agency, “Electricity 2024 - Analysis and forecast to 2026,” Paris, França, 2024. Accessed: Mar. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>

- [11] International Energy Agency, “Renewables 2023 - Analysis and forecasts to 2028,” Paris, França. Accessed: Mar. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- [12] Energy Institute, “Energy Institute Statistical Review of World Energy 2023,” Londres, Inglaterra, 2023. Accessed: Mar. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.energyinst.org/statistical-review/about>
- [13] International Energy Agency, “Electricity Market Report Update - Outlook for 2023 and 2024,” Paris, França, 2023. Accessed: Mar. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-update-2023>
- [14] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power System Harmonics*, 2nd ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
<https://doi.org/10.1002/0470871229>
- [15] H. Eroğlu, E. Cuce, P. M. Cuce, F. Gul, and A. Iskenderoğlu, “Harmonic problems in renewable and sustainable energy systems: A comprehensive review,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 48, p. 101566, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101566>
- [16] University of Wollongong, “Harmonic Study-Large Renewable Energy Generators,” Wollongong, Austrália, 2022. Accessed: Apr. 10, 2024. [Online]. Available: <https://arena.gov.au/assets/2022/05/harmonic-study-large-renewable-energy-generators-report.pdf>
- [17] F. C. Veliz, C. de O. Costa, S. L. Varricchio, and F. A. de Oliveira, “Avaliação do impacto das correntes harmônicas provenientes do SIN no dimensionamento da capacidade de absorção de correntes (‘rating’) de filtros passivos,” in *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXV SNPTEE)*, Brasília, 2023.
- [18] Y. Wang, J. Yong, Y. Sun, W. Xu, and D. Wong, “Characteristics of Harmonic Distortions in Residential Distribution Systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 3, pp. 1495–1504, Jun. 2017.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2606431>

- [19] P. A. B. Block, F. S. Retorta, D. B. Dahlke, and M. D. Teixeira, “Estudo comparativo do desempenho harmônico de aerogeradores,” in *Brasil Windpower - Conference & Exhibition*, Rio de Janeiro, 2015.
- [20] S. T. Y. Alfalahi *et al.*, “Supraharmonics in Power Grid: Identification, Standards, and Measurement Techniques,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 103677–103690, 2021.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3099013>
- [21] R. P. S. Leão, R. F. Sampaio, and F. L. M. Antunes, *Harmônicos em Sistemas Elétricos*, 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- [22] Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Procedimentos de Rede – Requisitos mínimos de qualidade da energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica. Submódulo 2.9,” Rio de Janeiro, Brasil, 2022.
- [23] Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Procedimentos de Rede – Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica. Submódulo 9.7,” Rio de Janeiro, Brasil, 2021.
- [24] International Electrotechnical Commission, “Electromagnetic compatibility (EMC) – 61000-3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems,” Geneva, Switzerland, 2008.
- [25] Institute of Electrical and Electronics Engineers, “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems - IEEE Std 519-2014,” New York, USA, 2014.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>
- [26] F. Safargholi, K. Malekian, and W. Schufft, “On the Dominant Harmonic Source Identification - Part I: Review of Methods,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 3, pp. 1268–1277, 2018.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2751663>
- [27] F. Safargholi, K. Malekian, and W. Schufft, “On the Dominant Harmonic Source Identification- Part II: Application and Interpretation of Methods,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 3, pp. 1278–1287, 2018.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2751673>

- [28] R. Sinvula, K. M. Abo-Al-Ez, and M. T. Kahn, "Harmonic Source Detection Methods: A Systematic Literature Review," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 74283–74299, 2019.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921149>
- [29] C. Garzón and A. Pavas, "Review of Responsibilities Assignment Methods for Harmonic Emission," in *2019 IEEE Milan PowerTech*, Milan, 2019.
<https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810742>
- [30] S. Xu, X.-Y. Xiao, X. Zheng, and Y. Wang, "Review on harmonic impacts assessment indices and methods of multiple harmonic sources," in *25th International Conference on Electricity Distribution*, Madrid, 2019, pp. 1–5.
<http://dx.doi.org/10.34890/380>
- [31] A. Spelko *et al.*, "CIGRE/CIRED JWG C4.42: Overview of Common Methods for Assessment of Harmonic Contribution from Customer Installation," in *2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, 2017.
<https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981195>
- [32] B. M. Giancesini, I. N. Santos, and P. F. Ribeiro, "Comparison of Methods for Determining Harmonic Distortion Contributions Using the IEEE Benchmark Test System," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 4, pp. 2398–2407, Aug. 2023.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2023.3242942>
- [33] I. Papic *et al.*, "A Benchmark Test System to Evaluate Methods of Harmonic Contribution Determination," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 1, pp. 23–31, 2019.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2817542>
- [34] L. Cristaldi and A. Ferrero, "Harmonic Power Flow Analysis for the Measurement of the Electric Power Quality," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 44, no. 3, pp. 683–685, 1995.
<https://doi.org/10.1109/19.387308>
- [35] P. H. Swart, M. J. Case, and J. D. Van Wyk, "On techniques for localization of sources producing distortion in electric power networks," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 4, no. 6, pp. 485–489, 1994.
<https://doi.org/10.1002/etep.4450040611>

- [36] K. Srinivasan, "On separating customer and supply side harmonic contributions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 2, pp. 1003–1008, 1996.
<https://doi.org/10.1109/61.489362>
- [37] K. Srinivasan and R. Jutras, "Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 212–217, 1998.
<https://doi.org/10.1109/61.660880>
- [38] W. Xu, X. Liu, and Y. Liu, "An Investigation on the Validity of Power Direction Method for Harmonic Source Determination," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 1, pp. 214–219, 2003.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.803842>
- [39] I. N. Santos, J. C. de Oliveira, and S. F. D. P. Silva, "Critical evaluation of the performance of the method of harmonic power flow to determine the dominant source of distortion," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 9, no. 5, pp. 740–746, 2011.
<https://doi.org/10.1109/TLA.2011.6030984>
- [40] I. N. Santos, "Uma Contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos para a Atribuição de Responsabilidades Sobre as Distorções Harmônicas," Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [41] Wilsun Xu and Yilu Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 804–811, 2000.
<https://doi.org/10.1109/61.853023>
- [42] W. Xu and Y. Liu, "A Method to Determine Customer Harmonic Contributions for Incentive-Based Harmonic Control Applications," in *1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364)*, Edmonton, 1999, pp. 361–366.
<https://doi.org/10.1109/PESS.1999.784375>
- [43] I. N. Santos and F. H. Costa, "Avaliação do Desempenho das Metodologias para a Representação de Consumidores Visando o Compartilhamento das Distorções Harmônicas," in *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (VIII CBQEE)*, Blumenau, 2009.

- [44] A. F. Zobaa and H. E. A. Aleem, *Power Quality in Future Electrical Power Systems*. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2017.
<https://doi.org/10.1049/PBPO092E>
- [45] M. Lamich, J. Balcells, M. Corbalán, and E. Griful, “Nonlinear Loads Model for Harmonics Flow Prediction, Using Multivariate Regression,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 6, pp. 4820–4837, 2017.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2674596>
- [46] CIGRE, “CIGRE C4/B4 Technical Brochure: Network modelling for harmonic studies. Reference: 766,” Paris, France, 2019.
- [47] A. de Oliveira, J. C. de Oliveira, J. W. Resende, and M. S. Miskulin, “Practical approaches for AC system harmonic impedance measurements,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 4, pp. 1721–1726, 1991.
<https://doi.org/10.1109/61.97712>
- [48] A. Robert and T. Deflandre, “Guide for assessing the network harmonic impedance - CIGRE WG CC02,” *Electra*, no. 167, 1996.
- [49] H. L. M. Monteiro, “Método de Estimaco de Impedncia utilizando Injeo de Pequenos Sinais,” Tese, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2018.
- [50] G. Moreau, H. H. Le, G. Croteau, G. Beaulieu, and E. Portales, “Measurement System for Harmonic Impedance of the Network and Validation Steps,” in *CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems*, Montreal, 2003, pp. 69–73.
<https://doi.org/10.1109/QSEPDS.2003.159798>
- [51] R. Stiegler, J. Meyer, P. Schegner, and D. Chakravorty, “Measurement of network harmonic impedance in presence of electronic equipment,” in *2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS 2015)*, Aachen, 2015.
<https://doi.org/10.1109/AMPS.2015.7312737>
- [52] H. L. M. Monteiro *et al.*, “Harmonic impedance measurement based on short time current injections,” *Electric Power Systems Research*, vol. 148, pp. 108–116, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.03.031>

- [53] V. Brito, B. Morais Giancesini, and I. Nunes Santos, “Avaliação da representação de cargas não lineares na aplicação de metodologia para compartilhamento de responsabilidades harmônicas,” in *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (XIV CBQEE)*, Foz do Iguaçu, 2021.
<https://doi.org/10.17648/cbqee-2021-130666>
- [54] C. Chen, X. Liu, D. Koval, W. Xu, and T. Tayjasant, “Critical Impedance Method - A new detecting harmonic sources method in distribution systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 288–297, Jan. 2004.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.820424>
- [55] F. Safargholi, K. Malekian, and W. Schufft, “‘Voltage-Current Ratio Difference’ Concept for identifying the dominant harmonic source,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 121, Oct. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106147>
- [56] I. N. Santos, J. C. de Oliveira, and A. C. dos Santos, “Dominant impedance method to assign harmonic voltage contributions at a point of common coupling,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 6, p. e12895: 1-16, 2021.
<https://doi.org/10.1002/2050-7038.12895>
- [57] A. C. dos Santos, I. N. Santos, and J. C. de Oliveira, “Capacitor switching methodology for responsibility sharing of harmonic voltage distortions,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 29, no. 12, p. e12135:1-16, 2019.
<https://doi.org/10.1002/2050-7038.12135>
- [58] A. C. dos Santos and I. N. Santos, “Assignment of harmonic voltage contributions using the harmonic current injection method,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 1, p. e12608: 1-15, 2021.
<https://doi.org/10.1002/2050-7038.12608>
- [59] F. Clement Veliz, S. L. Varricchio, and C. de Oliveira Costa, “Determination of harmonic contributions using active filter: Theoretical and experimental results,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 137, p. 107664, May 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107664>

- [60] F. Karimzadeh, S. Esmaceli, and S. H. Hosseinian, "Method for determining utility and consumer harmonic contributions based on complex independent component analysis," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 2, pp. 526–534, 2016.
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0997>
- [61] Y. Wang, W. Xu, J. Yong, and K. L. Chen, "Estimating harmonic impact of individual loads using harmonic phasor data," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 27, no. 10, p. e2384:1-12, 2017.
<https://doi.org/10.1002/etep.2384>
- [62] F. A. Pereira, S. F. de P. Silva, and I. N. Santos, "Blind source separation methods applied to evaluate harmonic contribution," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 12, Dec. 2021.
<https://doi.org/10.1002/2050-7038.13149>
- [63] J. Zhao, H. Yang, A. Pan, and F. Xu, "An improved complex ICA based method for wind farm harmonic emission levels evaluation," *Electric Power Systems Research*, vol. 179, Feb. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106105>
- [64] X. Zheng, X. Xiao, and Y. Wang, "An impedance matrix constrained-based method for harmonic emission level estimation," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 9, Sep. 2020.
<https://doi.org/10.1002/2050-7038.12479>
- [65] Y. Zhang, C. Lin, Z. Shao, and B. Liu, "A Non-Intrusive Identification Method of Harmonic Source Loads for Industrial Users," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 5, pp. 4358–4369, Oct. 2022.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2022.3168835>
- [66] E. O. de Matos, T. M. Soares, U. H. Bezerra, M. E. de L. Tostes, A. R. A. Manito, and B. C. Costa, "Using linear and non-parametric regression models to describe the contribution of non-linear loads on the voltage harmonic distortions in the electrical grid," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 8, pp. 1825–1832, 2016.
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0948>
- [67] J. Il Park, H. Lee, M. Yoon, and C. H. Park, "A novel method for assessing the contribution of harmonic sources to voltage distortion in power systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 76568–

76579, 2020.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2989000>

- [68] Y. Wang, H. E. Mazin, W. Xu, and B. Huang, “Estimating harmonic impact of individual loads using multiple linear regression analysis,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 809–824, 2016.
<https://doi.org/10.1002/etep.2109>
- [69] A. Manito, U. Bezerra, M. Tostes, E. Matos, C. Carvalho, and T. Soares, “Evaluating Harmonic Distortions on Grid Voltages Due to Multiple Nonlinear Loads Using Artificial Neural Networks,” *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 12, 2018.
<https://doi.org/10.3390/en11123303>
- [70] M. B. Arcadepani, D. T. Rodrigues, A. C. Moreira, J. P. Bonaldo, H. Guillard Junior, and H. K. M. Paredes, “Conservative Power Theory for Harmonic Voltage Responsibility Assignment,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 3, pp. 443–450, 2022.
<https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9667142>
- [71] Y. Sun *et al.*, “Harmonic contribution evaluation based on the distribution-level PMUs,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 2, pp. 909–919, Apr. 2021.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.2996677>
- [72] M. Tadayon, R. A. Hooshmand, A. Kiyoumars, and M. T. Esfahani, “Harmonic indices for continuous evaluation of consumer’s harmonic contribution,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 15, pp. 2901–2914, Aug. 2020.
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.0669>
- [73] J. Li, H. Fang, C. Liao, and J. Du, “A New Method for Determination of Harmonic Responsibility Based on Quality Engineering Theory,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 119071–119081, 2020.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001031>
- [74] M. Tadayon, R. A. Hooshmand, A. Kiyoumars, and M. T. Esfahani, “Imposing fair penalty to the harmonic sources based on the measurement data,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 15, no. 17, pp. 2446–2459, Sep. 2021.
<https://doi.org/10.1049/gtd2.12189>

- [75] H. Chen, T. Ding, L. Chen, and J. Shi, “A modified harmonic pricing scheme for customers based on quantifying the harmonic comprehensive contribution,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 130, Sep. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106905>
- [76] P. Shcherbakova, G. Senderovych, and A. Abramovitz, “An approach to assessing and accounting for consumers’ share of harmonic generation,” *Electric Power Systems Research*, vol. 212, Nov. 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108639>
- [77] A. Saadat, R. A. Hooshmand, A. Kiyoumars, and M. Tadayon, “Harmonic pricing in power systems based on identifying the appropriate contribution of customers,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 13, no. 1, pp. 73–80, 2019.
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5765>
- [78] S. Jaiswal and M. S. Ballal, “Method for fixing harmonic injection share of utility or consumer or both at the point of energy metering,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 16, pp. 3803–3811, 2018.
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.0249>
- [79] H. E. Mazin, E. E. Nino, W. Xu, and J. Yong, “A study on the harmonic contributions of residential loads,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1592–1599, 2011.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2096236>
- [80] W. Xu, “Power Direction Method Cannot Be Used for Harmonic Source Detection,” in *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134)*, Seattle, 2000, pp. 873–876.
<https://doi.org/10.1109/PESS.2000.867472>
- [81] C. Li and W. Xu, “On Defining Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling,” *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, no. 7, pp. 44–45, 2002.
<https://doi.org/10.1109/MPER.2002.4312345>
- [82] A. C. dos Santos, “Compartilhamento de Responsabilidades Harmônicas: Análises, Contribuições e Proposições,” Tese, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.
<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2445>

- [83] A. Špelko, I. Papič, R. Langella, A. Testa, and S. Djokic, “Temporal Variations of System Operating Conditions and Continuous Assessment of Low-Order Harmonic Emissions from Customer Installations: Modified IEC Approach,” in *25th International Conference on Electricity Distribution*, Madrid, 2019.
<http://dx.doi.org/10.34890/804>
- [84] F. C. Véliz, S. L. Varricchio, C. de O. Costa, O. A. da Cunha, and R. C. Amaral, “Metodologia Baseada em Medições e no uso de Filtros Ativos para a Determinação das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas Relativas à Conexão de Novas Instalações ao SIN,” in *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXIV SNPTEE)*, Curitiba, 2017.
- [85] F. C. Véliz, S. L. Varricchio, C. de O. Costa, I. F. da Nova, and L. E. D. Santos, “Validação por Meio de Medições da Metodologia que Utiliza Filtros Ativos e Medidores de Tensão e Corrente para a Determinação das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas no PAC,” in *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXV SNPTEE)*, Belo Horizonte, 2019.
- [86] A. Hyvärinen and E. Oja, “Independent component analysis: algorithms and applications,” *Neural Networks*, vol. 13, no. 4–5, pp. 411–430, 2000.
[https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(00\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(00)00026-5)
- [87] J. N. Kutz, *Data-Driven Modeling and Scientific Computing: Methods for Complex Systems & Big Data*. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- [88] E. Bingham and A. Hyvarinen, “A fast fixed-point algorithm for independent component analysis of complex valued signals,” *Int J Neural Syst*, vol. 10, no. 01, pp. 1–8, Feb. 2000.
<https://doi.org/10.1142/S0129065700000028>
- [89] Agência Nacional de Energia Elétrica, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica,” Brasília, Brasil, 2021.
- [90] IEEE PES, “IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group.” Accessed: Sep. 05, 2020. [Online]. Available: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>
- [91] University of Washington Electrical Engineering, “Power Systems Test Case Archive.” Accessed: Sep. 05, 2020. [Online]. Available: <https://labs.ece.uw.edu/pstca/>

- [92] Working Group 14.02 (Control in HVDC Systems) of Study Committee 14, “The CIGRE HVDC Benchmark Model - A new proposal with revised parameters - CIGRE WG 14.02,” *Electra*, no. 157, pp. 61–66, 1994.
- [93] CIGRE, “CIGRE C6 Technical Brochure: Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources. Reference: 575,” Paris, France, 2014.
- [94] S. Djokic, R. Langella, I. Papič, A. Špelko, and A. Testa, “Temporal Variations of System Operating Conditions and Continuous Assessment of Low-Order Harmonic Emissions from Customer Installations: Voltage Harmonic Vector Approach,” in *2019 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, Otranto, 2019, pp. 116–122.
<https://doi.org/10.1109/ICCEP.2019.8890073>
- [95] A. Spelko, I. Papić, and S. Z. Djokic, “A voltage-only method for assessing harmonic contribution from a customer installation,” in *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Ljubljana, 2018.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378909>
- [96] A. Spelko, I. Papič, A. Testa, R. Langella, and S. Z. Djokic, “Application of Voltage Harmonic Vector Method at the Interface between HV and MV Systems,” in *2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Dubai, 2020.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP46026.2020.9177902>
- [97] A. Špelko, I. Papič, and S. Z. Djokic, “A Network-Wide Evaluation of Single-Point Harmonic Contributions from Customer Installations: Comparison of Different Methods,” in *25th International Conference on Electricity Distribution*, Madrid, 2019, pp. 1–5.
<http://dx.doi.org/10.34890/659>
- [98] B. M. Ganesini, “Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de Benchmark do IEEE e aplicação de metodologias,” Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, 2020.
<http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.619>
- [99] G. Caravello, “Study, project and implementation of new metrics for distributed measurement system in medium voltage smart grid,” Doctoral Thesis, Università degli Studi di Palermo, 2022.

- [100] R. Sinvula, K. M. Abo-Al-Ez, and M. T. Kahn, "Harmonic power direction method for smart grids," in *AIUE Proceedings of the 18th Industrial and Commercial Use of Energy Conference 2020*, Cape Town, 2020.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.3734543>
- [101] F. Safargholi, "Voltage-Current Ratio Difference Method for Evaluation of Harmonic Interaction Between Utility and Customer," doctoral thesis, Technische Universität Chemnitz, 2022.
- [102] A. Špelko, B. Blažič, I. Papič, and L. Herman, "Active filter reference calculations based on customers' current harmonic emissions," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 1, Jan. 2021.
<https://doi.org/10.3390/en14010220>
- [103] H. Zheng, F. Xu, Q. Shu, C. Wang, and Q. Zhou, "Estimation of harmonic impedance and harmonic contribution with harmonic complex power in the absence of harmonic phase angle," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 17, no. 1, pp. 200–208, Jan. 2023.
<https://doi.org/10.1049/gtd2.12673>
- [104] F. Safargholi and K. Malekian, "Relevant factors for evaluation of the harmonic responsibility of utility and customer," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 1, pp. 124–134, Feb. 2021.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.2983256>
- [105] M. M. De Oliveira, M. A. A. Lima, L. R. M. Silva, C. A. Duque, and P. F. Ribeiro, "Independent Component Analysis for Distortion Estimation at Different Points of a Network with Multiple Harmonic Sources," in *2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP)*, Naples, 2022.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP53011.2022.9808668>
- [106] A. Spelko, I. Papič, S. Z. Djokic, and Z. Iqbal, "Use of Actual and Reference Impedances in Two Harmonic Emission Assessment Methods," in *2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP)*, Naples, 2022.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP53011.2022.9808637>
- [107] G. Caravello *et al.*, "Comparison of two different approaches for harmonic distortion sources assessment," in *2021 IEEE 11th International Workshop on Applied Measurements for Power*

Systems (AMPS), Cagliari, 2021.

<https://doi.org/10.1109/AMPS50177.2021.9586025>

- [108] G. Artale *et al.*, “A single-point approach based on nonactive power factor for the assessment of harmonic distortion sources in power systems,” in *2022 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Ottawa, 2022.

<https://doi.org/10.1109/I2MTC48687.2022.9806599>

- [109] G. M. de Carvalho, K. N. C. Silva, B. M. Giancesini, and I. N. Santos, “Avaliação do Método IEC para Compartilhamento de Responsabilidades Harmônicas utilizando o IEEE Benchmark Test System,” in *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (XV CBQEE)*, São Luís, 2023.

- [110] H. Cunha de Oliveira, C. de O. Dias, B. Morais Giancesini, and I. Nunes Santos, “Avaliação Computacional e Aplicação em Campo do Método do Chaveamento de Capacitores para o Compartilhamento de Responsabilidades Harmônicas,” in *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (XIV CBQEE)*, São Luís, 2023.

- [111] L. Herman and A. Špelko, “New Reference Current Calculation Method of a Hybrid Power Filter Based on Customer Harmonic Emission,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 23, Dec. 2023.

<https://doi.org/10.3390/en16237876>

- [112] R. Abu-Hashim *et al.*, “Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 579–587, 1999.

<https://doi.org/10.1109/61.754106>

- [113] F. Karimzadeh, S. Esmaili, and S. H. Hosseinian, “A Novel Method for Noninvasive Estimation of Utility Harmonic Impedance Based on Complex Independent Component Analysis,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 4, pp. 1843–1852, Aug. 2015.

<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2398820>

- [114] F. Xu, W. Wang, H. Zheng, Z. Luo, K. Guo, and C. Wang, “Harmonic impedance estimation considering the correlation between harmonic sources,” *Electric Power Systems Research*, vol. 209, Aug. 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107947>

- [115] Q. Shu, T. Liu, and F. Xu, "A new algorithm for calculating utility harmonic impedance," *Electric Power Systems Research*, vol. 191, Feb. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106893>
- [116] International Electrotechnical Commission, "Electromagnetic compatibility (EMC) – 61000-4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto," Geneva, Switzerland, 2009.
- [117] Ana Maria Blanco, Robert Stiegler, Jan Meyer, and Michael Schwenke, "Implementation of harmonic phase angle measurement for power quality instruments," in *2016 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, Aachen, 2016.
<https://doi.org/10.1109/AMPS.2016.7602811>
- [118] J. C. de Oliveira *et al.*, "Relatório Técnico 1/8: Revisão Bibliográfica - Regulamentos e normas nacionais e internacionais e principais pesquisas já realizadas no Brasil e no exterior," Uberlândia, Brasil, 2014. Accessed: Mar. 21, 2024. [Online]. Available: https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/consultas-publicas-antigas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_ideDocumento=34662&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_tipoFaseReuniao=fase&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fvisualizar.jsp
- [119] Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos acessos à rede básica ou aos barramentos de fronteira com a rede básica para parques eólicos, solares, consumidores livres e distribuidoras - ONS NT 009/2016 - REV 03," Rio de Janeiro, Brasil, 2019.
- [120] I. N. Santos, B. M. Giancesini, G. da S. Troncha, R. C. F. Gregory, C. R. Azevedo Jr., and V. H. F. Brito, "Application of a Methodology for Determining Voltage Harmonic Contributions in a Low-Voltage Busbar," in *Cigré Paris Session 2022*, Paris, 2022.

- [121] Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Manual de Procedimentos da Operação - MPO.” Accessed: Mar. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-ons/procedimentos-de-rede/mpo>
- [122] International Electrotechnical Commission, “Electromagnetic compatibility (EMC) – 61000-4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods,” Geneva, Switzerland, 2021.
- [123] J. Meyer, A.-M. Blanco, M. Domagk, and P. Schegner, “Assessment of Prevailing Harmonic Current Emission in Public Low-Voltage Networks,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 2, pp. 962–970, Apr. 2017.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2558187>
- [124] M. U. Usman and M. O. Faruque, “Applications of synchrophasor technologies in power systems,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 211–226, Mar. 2019.
<https://doi.org/10.1007/s40565-018-0455-8>
- [125] International Electrotechnical Commission, “IEC/TR 61869-103: Instrument transformers – The use of instrument transformers for power quality measurement,” Geneva, Switzerland, 2012.
- [126] K. Kunde, H. Däumling, R. Huth, H. Schlierf, and J. Schmid, “Frequency Response of Instrument Transformers in the kHz range,” pp. 1–4, 2012, Accessed: Apr. 10, 2024. [Online]. Available: <https://powerquality.blog/2021/03/11/frequency-response-of-instrument-transformers-in-the-khz-range/>
- [127] J. Annabattula, D. Yelamanchi, and T. S. Sirish, “Factors Influencing The Frequency Response Of Capacitive Voltage Transformer,” *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 3, no. 8, pp. 11079–11085, Aug. 2014.
<https://doi.org/10.15662/ijareeie.2014.0308020>
- [128] N. Assugeni Neto, P. A. B. Block, A. F. Bonelli, and P. H. Roesler, “Análise da resposta em frequência de transformadores de potencial e seu impacto na QEE,” in *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (XV CBQEE)*, São Luis, 2023.

- [129] Yiyen Electric Technology, “Active Harmonic Filter (AHF).” 2022. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.yiyen.com/product/power-quality-products/?keyword=active%20power%20filter&82E75F5AF5D2D01C&matchtype=b&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw-_mvBhDwARIsAA-Q0Q6gR2OA71galeD_t5g5_NQSKFR2j2-mKHMIaUNQenkNiO2KoRIDPkUaAkxOEALw_wcB#
- [130] ABB, “Power Quality Filters PQFI-PQFM-PQFK-PQFS - Catalog.” 2010. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/ac5f3b1afa4e734dc12577d7004d5e05/2GCS304018A0070-PQF%20Pamphlet.pdf>
- [131] GE Grid Solutions, “MaxSine Compact - Active Harmonic Filter Catalog.” 2017. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.gegridsolutions.com/app/resources.aspx?prod=ActiveFilter&type=1>
- [132] J. G. Falco, *Estatística Aplicada*. Cuiabá: EdUFMT, 2008.
- [133] Fluke Corporation, “Fluke 434/435 Three Phase Power Quality Analyzer - Guia do Usuário,” 2007.
- [134] Fluke Corporation, “GPS 430-II - GPS Synchronization Module: Instruction Sheet.” 2015. [Online]. Available: <http://us.fluke.com/usen/support/manuals>.

APÊNDICE A. RESULTADOS DOS FASORES DE CONTRIBUIÇÃO OBTIDOS PELOS MÉTODOS HCD - IEEE-BTS-HCD

Os resultados de contribuição do MID, MCC, MICH, MIEC, MFA e MCICA são comparados com o MVH, definido como método de referência. Calculou-se as discrepâncias relativas dos fasores de contribuição utilizando a equação:

$$\Delta V_{X-PAC-h} = \left| \frac{V_{X-PAC-h}(MHCD) - \underline{V}_{X-PAC-h}(MVH)}{\underline{V}_{PAC-h}} \right| \cdot 100\% \quad (48)$$

Sendo X correspondente a S , para o sistema supridor, ou C , consumidor. $MHCD$ corresponde às grandezas obtidas pelos métodos MID, MCC, MICH, MIEC, MFA e MCICA.

Todos os resultados que acarretaram diferenças superiores a 5% encontram-se destacados nas tabelas. O destaque laranja representa aquelas discrepâncias entre 5% e 10%, e em amarelo as maiores que 10%.

- **Condição A**

Tabela 17 – Fasores de contribuição obtidos pelos Métodos HCD. IEEE-BTS-HCD - Condição A.

Condição A	PAC 01		PAC 03		
	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	
5 ^a ordem	MVH	0,0∠0,3°	24,7∠74,7°	23,3∠76,6°	0,0∠-49,5°
	MIEC	0,0∠68,0°	24,7∠74,6°	23,9∠76,7°	0,0∠0,0°
	MFA	0,0∠50,9°	24,7∠74,6°	23,3∠76,7°	0,0∠-14,2°
	MID	0,1∠51,6°	24,6∠74,7°	23,3∠76,6°	0,0∠-2,5°
	MCC	0,0∠146,5°	24,7∠74,6°	23,3∠76,6°	0,0∠-1,3°
	MICH	0,0∠101,1°	24,7∠74,6°	23,3∠76,6°	0,0∠-116,2°
	MCICA	25,2∠75,1°	0,5∠-81,4°	23,7∠77,0°	0,4∠-80,8°
7 ^a ordem	MVH	0,0∠-150,6°	18,9∠-0,3°	17,8∠0,7°	0,0∠-179,7°
	MIEC	0,0∠56,4°	18,8∠-0,3°	18,1∠0,9°	0,0∠0,0°
	MFA	0,0∠166,2°	18,8∠-0,3°	17,8∠0,8°	0,0∠-95,8°
	MID	0,0∠117,0°	18,8∠-0,3°	17,8∠0,7°	0,0∠58,5°
	MCC	0,0∠-145,7°	18,8∠-0,3°	17,8∠0,7°	0,0∠-2,3°
	MICH	0,0∠121,0°	18,9∠-0,3°	17,8∠0,7°	0,0∠70,7°
	MCICA	0,2∠-36,5	18,7∠0,1°	0,2∠-61,1°	17,7∠1,2°
11 ^a ordem	MVH	0,1∠-78,5°	23,3∠20,4°	22,1∠20,1°	0,0∠55,3°
	MIEC	0,0∠-120,1°	23,3∠20,2°	22,1∠20,9°	0,3∠-61,3°
	MFA	0,0∠16,7°	23,3∠20,2°	22,2∠19,8°	0,1∠137,5°
	MID	0,0∠98,8°	23,3∠20,2°	22,1∠20,1°	0,0∠-5,5°
	MCC	0,0∠-131,2°	23,3∠20,2°	22,1∠20,1°	0,0∠-2,9°
	MICH	0,0∠-2,2°	23,3∠20,2°	22,1∠20,1°	0,0∠-149,9°
	MCICA	23,1∠19,3°	0,5∠79,3°	0,7∠-93,7°	22,4∠21,8°
13 ^a ordem	MVH	0,0∠128,4°	5,5∠-30,0°	5,3∠-30,6°	0,0∠-150,6°
	MIEC	0,0∠-138,5°	5,5∠-30,0°	5,2∠-29,0°	0,2∠-87,5°
	MFA	0,0∠-25,4°	5,5∠-30,0°	5,3∠-30,7°	0,0∠68,7°
	MID	0,0∠56,9°	5,5∠-30,0°	5,3∠-30,6°	0,0∠45,0°
	MCC	0,0∠-115,2°	5,5∠-30,0°	5,3∠-30,6°	0,0∠7,0°
	MICH	0,0∠148,0°	5,5∠-30,0°	5,3∠-30,6°	0,0∠-160,9°
	MCICA	0,0∠53,6°	5,5∠-30,3°	0,1∠-30,7°	5,2∠-30,6°

Fonte: Autoria própria.

- **Condição B**

Tabela 18 – Fasores de contribuição obtidos pelos Métodos HCD. IEEE-BTS-HCD - Condição B.

Condição B	PAC 01		PAC 03		
	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	
5 ^a ordem	MVH	0,0∠-2,2°	24,9∠74,1°	23,6∠76,0°	0,0∠-148,2°
	MIEC	0,0∠80,1°	24,9∠74,1°	23,9∠76,7°	0,0∠0,0°
	MFA	0,0∠101,5°	24,9∠74,1°	23,6∠76,0°	0,0∠-80,5°
	MID	0,1∠37,9°	24,9∠74,2°	23,6∠76,0°	0,0∠-11,9°
	MCC	0,0∠153,1°	24,9∠74,0°	23,6∠76,0°	0,0∠-169,8°
	MICH	0,1∠99,6°	24,9∠74,0°	23,6∠76,0°	0,0∠58,9°
	MCICA	0,5∠-85,8°	25,4∠74,5°	0,5∠-136,4°	24,0∠75,3°
7 ^a ordem	MVH	0,0∠-160,6°	19,3∠-1,1°	18,3∠-0,2°	0,0∠168,3°
	MIEC	0,0∠94,1°	19,3∠-1,1°	18,1∠0,9°	0,4∠-62,4°
	MFA	0,0∠152,2°	19,3∠-1,1°	18,3∠-0,3°	0,0∠58,4°
	MID	0,0∠70,1°	19,3∠-1,1°	18,3∠-0,2°	0,0∠17,0°
	MCC	0,0∠170,1°	19,3∠-1,1°	18,3∠-0,2°	0,0∠-168,8°
	MICH	0,0∠112,8°	19,3∠-1,1°	18,3∠-0,2°	0,0∠-161,3°
	MCICA	0,2∠-50,9°	19,2∠-0,7°	18,2∠0,2°	0,2∠-53,2°
11 ^a ordem	MVH	0,1∠-102,1°	28,1∠2,9°	28,0∠0,1°	0,1∠-17,9°
	MIEC	0,0∠178,5°	28,1∠2,7°	22,1∠20,9°	10,9∠-46,5°
	MFA	0,0∠172,2°	28,1∠2,7°	28,1∠0,0°	0,0∠-13,2°
	MID	0,0∠-172,4°	28,1∠2,7°	28,1∠0,0°	0,0∠-61,1°
	MCC	0,1∠154,3°	28,2∠2,6°	28,1∠0,0°	0,0∠-176,8°
	MICH	0,0∠-24,3°	28,1∠2,7°	28,1∠0,0°	0,0∠157,4°
	MCICA	0,4∠40,0°	27,8∠2,2°	28,5∠0,9°	0,6∠-133,3°
13 ^a ordem	MVH	0,0∠74,3°	4,4∠-28,4°	4,0∠-28,6°	0,0∠25,1°
	MIEC	0,0∠-162,6°	4,4∠-28,4°	5,2∠-29,0°	0,0∠0,0°
	MFA	0,0∠8,0°	4,4∠-28,4°	4,0∠-28,6°	0,0∠26,6°
	MID	0,0∠133,0°	4,4∠-28,4°	4,0∠-28,5°	0,0∠137,4°
	MCC	0,0∠8,1°	4,4∠-28,4°	4,0∠-28,8°	0,0∠35,0°
	MICH	0,0∠34,4°	4,4∠-28,4°	4,0∠-28,6°	0,0∠25,1°
	MCICA	4,3∠-28,6°	0,1∠-18,4°	3,9∠-28,9°	0,0∠5,7°

Fonte: Autoria própria.

- **Condição C**

Tabela 19 – Fasores de contribuição obtidos pelos Métodos HCD. IEEE-BTS-HCD - Condição C.

Condição C	PAC 01		PAC 02		PAC 03		
	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	
5 ^a ordem	MVH	14,0∠119,5°	28,3∠72,9°	26,7∠74,6°	15,6∠117,5°	38,0∠89,6°	0,0∠-26,2°
	MIEC	13,8∠120,8°	28,6∠72,7°	28,2∠74,5°	14,6∠121,6°	39,0∠89,6°	0,0∠0,0°
	MFA	14,0∠119,5°	28,3∠72,9°	26,8∠74,7°	15,5∠117,5°	38,0∠89,7°	0,0∠-0,6°
	MID	14,0∠119,6°	28,3∠72,8°	26,7∠74,7°	15,5∠117,4°	38,0∠89,6°	0,0∠-173,7°
	MCC	14,2∠121,7°	28,6∠71,9°	27,8∠72,2°	15,7∠123,3°	38,0∠89,6°	0,0∠7,2°
	MICH	14,1∠119,5°	28,2∠72,8°	26,7∠74,6°	15,6∠117,6°	38,0∠89,6°	0,0∠-108,5°
	MCICA	14,5∠118,7°	27,8∠72,4°	27,3∠75,3°	14,9∠118,2°	38,8∠89,4°	0,8∠-102,5°
7 ^a ordem	MVH	11,5∠34,7°	26,6∠-6,9°	25,4∠-6,6°	12,6∠34,8°	35,0∠6,1°	0,0∠-162,7°
	MIEC	11,0∠38,0°	27,4∠-7,2°	26,2∠-6,7°	12,0∠37,5°	35,8∠6,0°	0,0∠0,0°
	MFA	11,6∠34,5°	26,5∠-6,9°	25,4∠-6,5°	12,5∠34,6°	35,0∠6,1°	0,0∠-88,0°
	MID	11,6∠34,6°	26,6∠-7,0°	25,4∠-6,5°	12,6∠34,6°	35,0∠6,1°	0,0∠95,4°
	MCC	11,8∠37,9°	26,9∠-8,3°	26,1∠-8,7°	12,8∠40,0°	35,0∠6,1°	0,0∠8,0°
	MICH	11,5∠34,8°	26,6∠-7,0°	25,5∠-6,5°	12,5∠34,8°	35,0∠6,0°	0,0∠98,6°
	MCICA	11,9∠33,4°	26,2∠-7,1°	25,1∠-5,4°	12,5∠31,9°	1,2∠-102,2°	35,4∠7,9°
11 ^a ordem	MVH	10,6∠-100,5°	39,7∠-9,3°	38,9∠-10,7°	11,6∠-96,6°	40,6∠-26,0°	0,0∠-59,5°
	MIEC	18,8∠-124,0°	47,8∠-1,5°	40,1∠-8,6°	13,0∠-102,2°	40,6∠-25,1°	0,7∠-109,8°
	MFA	10,4∠-99,6°	39,5∠-9,6°	38,9∠-11,0°	11,4∠-96,6°	40,7∠-26,3°	0,2∠91,9°
	MID	10,3∠-99,3°	39,5∠-9,7°	38,8∠-10,9°	11,5∠-96,3°	40,6∠-26,0°	0,0∠131,5°
	MCC	10,5∠-102,1°	40,0∠-9,4°	39,3∠-11,2°	11,2∠-98,5°	40,6∠-26,0°	0,0∠2,0°
	MICH	10,5∠-100,6°	39,7∠-9,4°	39,1∠-10,6°	11,7∠-97,4°	40,6∠-26,0°	0,0∠124,3°
	MCICA	9,8∠-100,4°	39,7∠-10,4°	38,6∠-8,7°	12,9∠-95,6°	40,5∠-25,1°	0,7∠-108,0°
13 ^a ordem	MVH	11,2∠165,5°	11,2∠-113,0°	11,2∠-114,8°	11,3∠169,4°	17,3∠-155,0°	0,0∠15,4°
	MIEC	10,5∠152,4°	13,7∠-115,7°	11,4∠-112,6°	11,7∠167,8°	17,6∠-152,0°	0,0∠0,0°
	MFA	11,2∠165,5°	11,2∠-113,1°	11,2∠-115,0°	11,3∠169,3°	17,3∠-155,1°	0,0∠-50,8°
	MID	11,0∠166,3°	11,1∠-114,2°	11,1∠-115,9°	11,2∠170,3°	17,3∠-155,0°	0,0∠-47,0°
	MCC	11,4∠169,0°	10,5∠-112,7°	10,7∠-114,5°	11,5∠171,6°	17,3∠-155,0°	0,0∠10,5°
	MICH	11,2∠165,4°	11,2∠-113,1°	11,2∠-115,0°	11,3∠169,4°	17,3∠-155,0°	0,0∠-4,1°
	MCICA	11,5∠166,5°	10,9∠-111,8°	10,9∠-114,5°	11,5∠170,6°	18,0∠-156,5°	0,8∠-9,0°

Fonte: Autoria própria.

- **Condição A-BG**

Tabela 20 – Fasores de contribuição obtidos pelos Métodos HCD. IEEE-BTS-HCD - Condição A-BG.

Condição A-BG	PAC 01		PAC 03		
	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	
5 ^a ordem	MVH	23,9∠67,8°	24,8∠75,0°	47,1∠72,4°	0,0∠-41,7°
	MIEC	23,6∠68,3°	25,1∠74,5°	48,1∠72,3°	0,0∠0,0°
	MFA	23,9∠67,7°	24,8∠75,1°	47,1∠72,4°	0,0∠-14,7°
	MID	24,0∠67,6°	24,7∠75,2°	47,1∠72,4°	0,0∠-24,9°
	MCC	24,4∠68,0°	24,3∠75,0°	47,1∠72,4°	0,0∠62,9°
	MICH	23,9∠67,9°	24,7∠75,0°	47,1∠72,4°	0,0∠94,2°
	MCICA	26,5∠68,3°	22,2∠75,3°	0,7∠-104,8°	47,8∠72,5°
7 ^a ordem	MVH	20,3∠-22,6°	19,0∠0,9°	37,4∠-11,0°	0,0∠166,1°
	MIEC	19,6∠-21,3°	19,5∠-1,0°	38,0∠-11,0°	0,0∠0,0°
	MFA	20,4∠-22,7°	19,0∠1,1°	37,4∠-10,9°	0,0∠-102,9°
	MID	20,4∠-22,6°	19,0∠1,0°	37,4∠-11,0°	0,0∠62,3°
	MCC	20,3∠-21,8°	19,0∠0,1°	37,4∠-11,0°	0,0∠59,0°
	MICH	20,3∠-22,5°	19,1∠0,9°	37,4∠-11,0°	0,0∠122,6°
	MCICA	19,7∠-22,9°	19,6∠0,5°	0,5∠-24,7°	36,9∠-10,8°
11 ^a ordem	MVH	15,5∠-56,4°	22,8∠18,8°	30,0∠-12,2°	0,0∠14,2°
	MIEC	22,8∠-55,6°	21,8∠37,4°	29,8∠-11,6°	0,4∠-65,6°
	MFA	15,4∠-56,3°	22,8∠18,4°	30,1∠-12,4°	0,2∠104,9°
	MID	15,4∠-56,0°	22,7∠18,4°	30,0∠-12,2°	0,0∠144,9°
	MCC	15,9∠-57,0°	22,9∠19,7°	30,0∠-12,2°	0,0∠57,9°
	MICH	15,6∠-56,2°	22,7∠18,9°	30,0∠-12,2°	0,0∠41,3°
	MCICA	14,9∠-57,9°	23,4∠17,6°	0,5∠-78,3°	29,8∠-11,2°
13 ^a ordem	MVH	16,6∠-167,3°	5,7∠-32,5°	13,6∠-150,9°	0,0∠838°
	MIEC	18,9∠-170,4°	0,0∠0,0°	13,3∠-150,3°	0,3∠-173,4°
	MFA	16,6∠-167,4°	5,7∠-32,7°	13,6∠-151,0°	0,0∠-54,6°
	MID	16,6∠-167,7°	5,8∠-33,5°	13,6∠-150,9°	0,0∠127,4°
	MCC	16,4∠-165,6°	5,2∠-30,7°	13,6∠-150,9°	0,0∠29,0°
	MICH	16,6∠-167,3°	5,7∠-32,6°	13,6∠-150,9°	0,0∠154,1°
	MCICA	16,8∠-166,3°	5,6∠-29,4°	0,6∠93,1°	13,8∠-148,7°

Fonte: Autoria própria.

- **Condição B-BG**

Tabela 21 – Fasores de contribuição obtidos pelos Métodos HCD. IEEE-BTS-HCD - Condição B-BG.

Condição B-BG	PAC 01		PAC 03		
	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	
5 ^a ordem	MVH	24,2∠67,6°	25,0∠74,6°	47,6∠72,1°	0,0∠-54,6°
	MIEC	23,8∠68,1°	25,3∠74,0°	48,1∠72,3°	0,0∠0,0°
	MFA	24,1∠67,5°	25,0∠74,7°	47,6∠72,1°	0,1∠-24,3°
	MID	24,2∠67,4°	25,0∠74,8°	47,6∠72,1°	0,0∠-34,6°
	MCC	24,7∠68,7°	24,5∠73,6°	47,6∠72,1°	0,0∠129,1°
	MICH	24,1∠67,6°	25,0∠74,7°	47,6∠72,1°	0,0∠39,4°
	MCICA	22,4∠74,9°	26,8∠68,1°	48,3∠72,5°	0,8∠-81,1°
7 ^a ordem	MVH	20,9∠-23,2°	19,6∠0,5°	38,6∠-11,6°	0,0∠-17,7°
	MIEC	20,2∠-21,9°	20,1∠-1,6°	38,0∠-11,0°	0,7∠-46,3°
	MFA	21,0∠-23,3°	19,5∠0,6°	38,6∠-11,7°	0,0∠87,9°
	MID	21,0∠-23,2°	19,5∠0,5°	38,6∠-11,6°	0,0∠-14,6°
	MCC	21,0∠-20,9°	19,2∠-1,7°	38,6∠-11,6°	0,0∠152,8°
	MICH	20,9∠-23,2°	19,6∠0,4°	38,6∠-11,6°	0,0∠8,1°
	MCICA	20,3∠-23,6°	20,2∠0,1°	0,5∠-31,5°	38,1∠-11,4°
11 ^a ordem	MVH	19,1∠-73,6°	27,5∠1,4°	38,4∠-31,6°	0,1∠-50,7°
	MIEC	30,1∠-82,5°	31,5∠22,9°	29,8∠-11,6°	14,6∠-75,9°
	MFA	18,9∠-73,3°	27,5∠1,0°	38,4∠-31,6°	0,0∠-124,6°
	MID	18,9∠-73,0°	27,4∠1,0°	38,4∠-31,6°	0,0∠-96,8°
	MCC	19,5∠-73,9°	27,5∠2,3°	38,4∠-31,6°	0,0∠99,7°
	MICH	19,2∠-73,5°	27,5∠1,7°	38,4∠-31,6°	0,0∠-14,4°
	MCICA	18,3∠-75,1°	28,2∠0,2°	0,8∠-71,8°	37,8∠-30,8°
13 ^a ordem	MVH	12,7∠-162,6°	4,5∠-32,2°	10,2∠-144,9°	0,0∠-11,5°
	MIEC	14,0∠-164,5°	0,0∠0,0°	13,3∠-150,3°	0,0∠0,0°
	MFA	12,7∠-162,6°	4,5∠-32,2°	10,2∠-144,9°	0,0∠123,3°
	MID	12,6∠-163,0°	4,5∠-33,8°	10,2∠-144,9°	0,0∠1,1°
	MCC	13,0∠-159,1°	4,1∠-22,3°	10,2∠-144,9°	0,0∠-134,5°
	MICH	12,7∠-162,6°	4,5∠-32,2°	10,2∠-144,9°	0,0∠-21,2°
	MCICA	12,8∠-161,4°	4,4∠-28,5°	0,2∠58,6°	10,4∠-144,5°

Fonte: Autoria própria.

- **Condição C-BG**

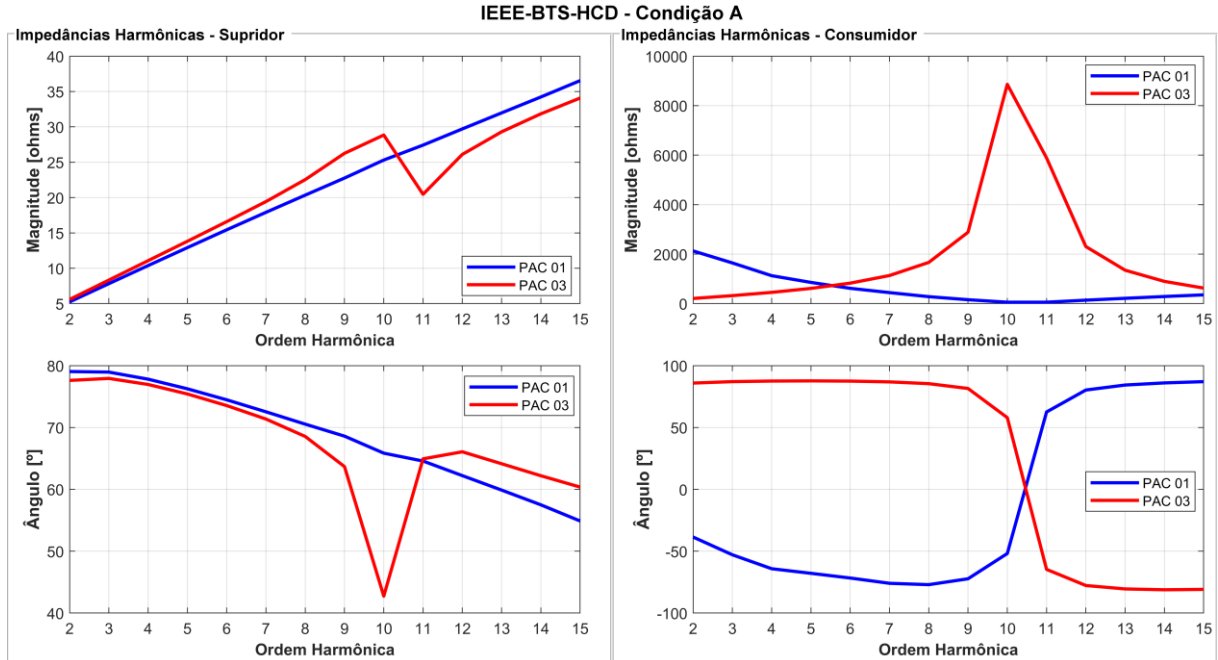
Tabela 22 – Fasores de contribuição obtidos pelos Métodos HCD. IEEE-BTS-HCD - Condição C-BG.

Condição C-BG	PAC 01		PAC 02		PAC 03		
	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	\underline{V}_{S-PAC}	\underline{V}_{C-PAC}	
5ª ordem	MVH	37,3∠83,3°	28,4∠73,5°	53,8∠70,5°	15,7∠117,4°	64,1∠80,0°	0,0∠-43,9°
	MIEC	36,7∠84,2°	29,2∠72,7°	56,8∠70,2°	14,1∠127,5°	65,7∠79,8°	0,0∠0,0°
	MFA	37,3∠83,3°	28,4∠73,6°	53,9∠70,5°	15,6∠117,6°	64,1∠80,0°	0,0∠-11,0°
	MID	37,3∠83,3°	28,5∠73,6°	53,9∠70,6°	15,6∠117,5°	64,1∠80,0°	0,0∠174,4°
	MCC	38,5∠84,8°	27,5∠71,1°	54,9∠69,7°	15,5∠122,4°	64,1∠80,0°	0,0∠110,8°
	MICH	37,3∠83,4°	28,4∠73,5°	53,9∠70,5°	15,6∠117,6°	64,1∠80,0°	0,0∠55,5°
	MCICA	40,8∠82,7°	25,0∠73,2°	54,9∠71,2°	14,5∠118,7°	65,1∠80,1°	1,1∠-91,3°
7ª ordem	MVH	35,1∠-13,6°	27,3∠-5,1°	53,3∠-18,5°	12,6∠35,0°	61,0∠-9,7°	0,0∠-168,0°
	MIEC	33,4∠-11,2°	28,9∠-8,4°	55,2∠-18,9°	11,9∠43,4°	62,3∠-10,0°	0,0∠0,0°
	MFA	35,3∠-13,7°	27,1∠-4,9°	53,3∠-18,5°	12,6∠35,1°	61,0∠-9,7°	0,1∠-103,0°
	MID	35,3∠-13,6°	27,1∠-5,0°	53,3∠-18,5°	12,6∠35,0°	61,0∠-9,7°	0,0∠93,5°
	MCC	36,0∠-10,8°	26,3∠-8,6°	54,0∠-19,1°	12,7∠38,7°	61,0∠-9,7°	0,0∠2,4°
	MICH	35,0∠-13,6°	27,3∠-5,1°	53,4∠-18,5°	12,6∠35,1°	61,0∠-9,7°	0,0∠77,0°
	MCICA	34,7∠-13,4°	27,7∠-5,6°	52,3∠-17,8°	12,8∠29,6°	1,2∠-85,8°	60,7∠-8,6°
11ª ordem	MVH	37,6∠-88,1°	37,6∠-10,8°	53,0∠-42,2°	11,5∠-96,4°	59,6∠-50,9°	0,0∠-84,3°
	MIEC	67,7∠-112,3°	66,4∠15,8°	53,4∠-41,1°	12,2∠-100,6°	59,4∠-50,2°	0,8∠-123,9°
	MFA	37,2∠-87,6°	37,4∠-11,4°	53,2∠-42,4°	11,3∠-96,6°	59,7∠-51,2°	0,3∠63,4°
	MID	36,9∠-87,2°	37,2∠-12,0°	53,0∠-42,4°	11,4∠-95,9°	59,6∠-50,9°	0,0∠-2,2°
	MCC	37,2∠-89,7°	38,7∠-11,1°	53,4∠-42,4°	11,2∠-97,5°	59,6∠-50,9°	0,0∠58,1°
	MICH	37,9∠-88,3°	37,7∠-10,3°	53,1∠-42,0°	11,6∠-97,1°	59,6∠-50,9°	0,0∠23,4°
	MCICA	36,6∠-89,7°	38,8∠-11,8°	52,4∠-41,8°	12,2∠-95,2°	59,0∠-50,7°	0,6∠-70,2°
13ª ordem	MVH	41,4∠127,5°	11,4∠-118,3°	28,4∠134,5°	11,5∠169,4°	38,9∠143,2°	0,0∠-44,2°
	MIEC	39,0∠114,1°	19,5∠-138,8°	27,7∠131,8°	12,9∠172,2°	39,2∠145,5°	0,0∠0,0°
	MFA	41,3∠127,5°	11,4∠-118,4°	28,5∠134,5°	11,4∠169,6°	38,9∠143,1°	0,1∠-116,8°
	MID	40,7∠127,5°	11,2∠-121,5°	28,6∠134,7°	11,3∠169,4°	38,9∠143,2°	0,0∠82,2°
	MCC	40,5∠129,7°	9,6∠-119,3°	28,9∠134,4°	11,1∠170,9°	38,9∠143,2°	0,0∠-97,6°
	MICH	41,3∠127,5°	11,4∠-118,6°	28,5∠134,5°	11,4∠169,6°	38,9∠143,2°	0,0∠-36,7°
	MCICA	42,2∠128,6°	11,0∠-112,7°	29,3∠135,9°	10,4∠169,0°	40,8∠143,4°	2,0∠-31,4°

Fonte: Autoria própria

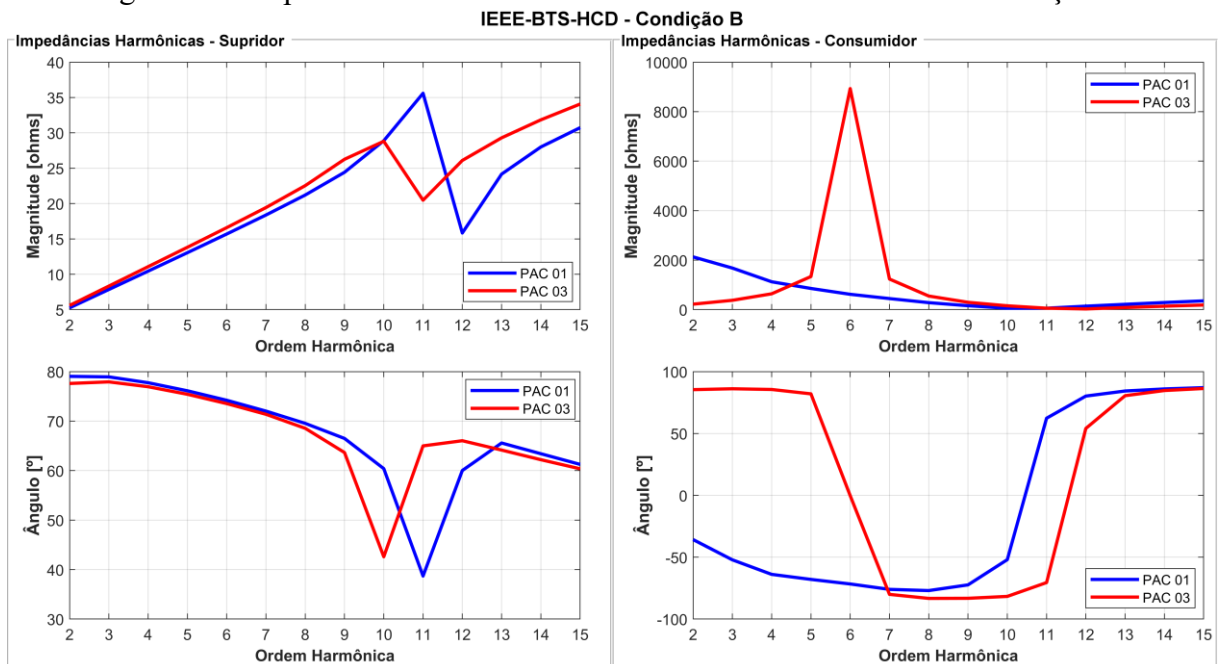
APÊNDICE B. IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS - IEEE-BTS-HCD

Figura 44 – Impedâncias harmônicas medidas no IEEE-BTS-HCD - Condição A.



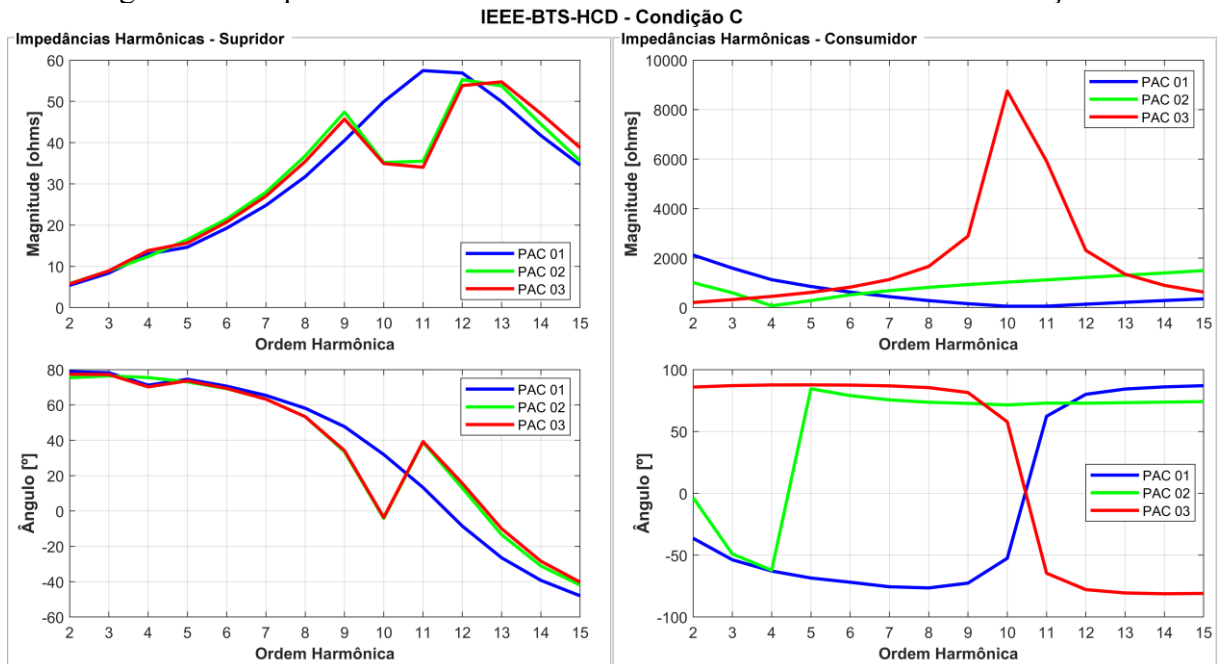
Fonte: Autoria própria.

Figura 45 – Impedâncias harmônicas medidas no IEEE-BTS-HCD - Condição B.



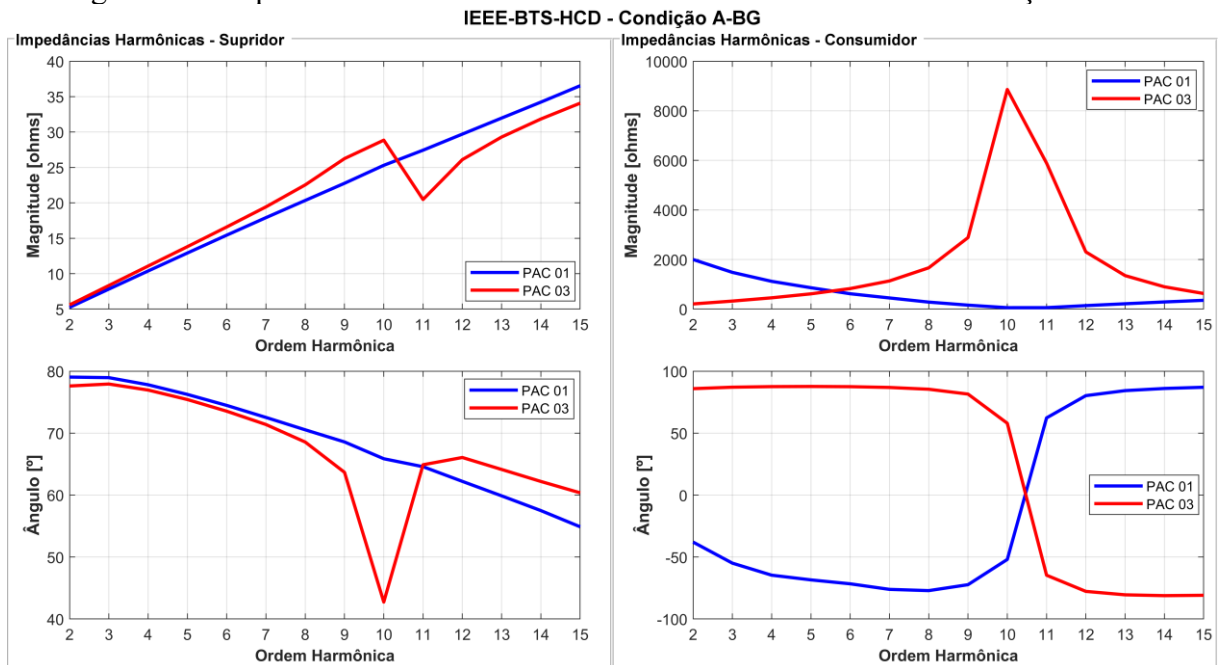
Fonte: Autoria própria.

Figura 46 – Impedâncias harmônicas medidas no IEEE-BTS-HCD - Condição C.



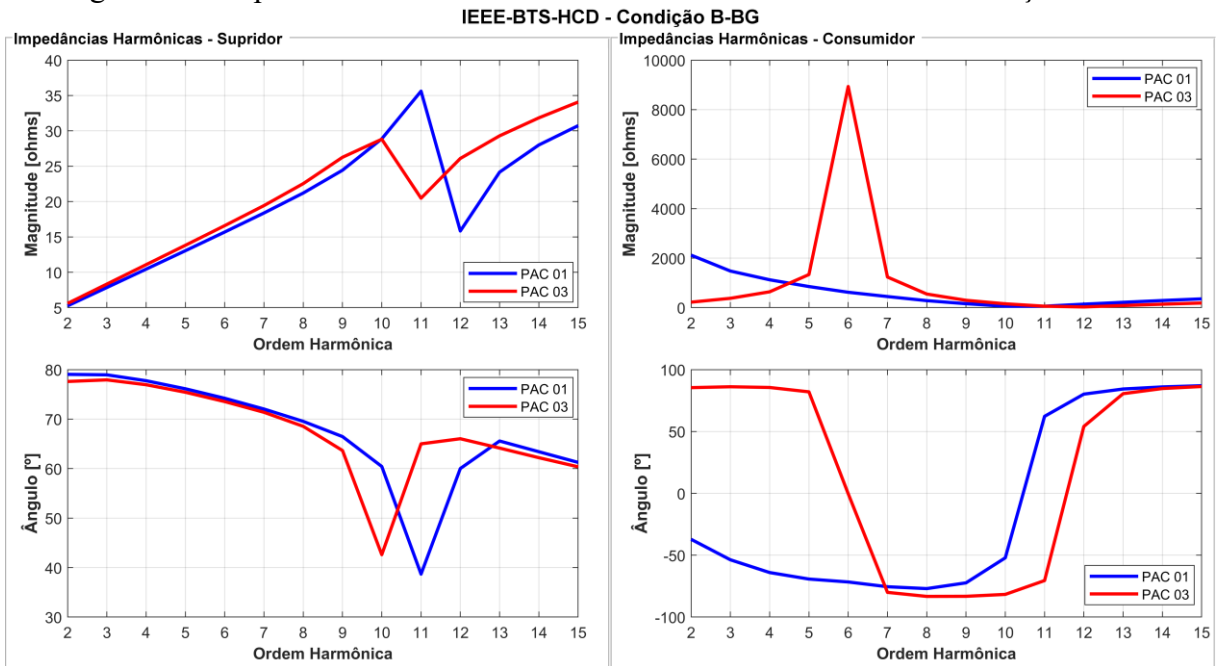
Fonte: Autoria própria.

Figura 47 – Impedâncias harmônicas medidas no IEEE-BTS-HCD - Condição A-BG.



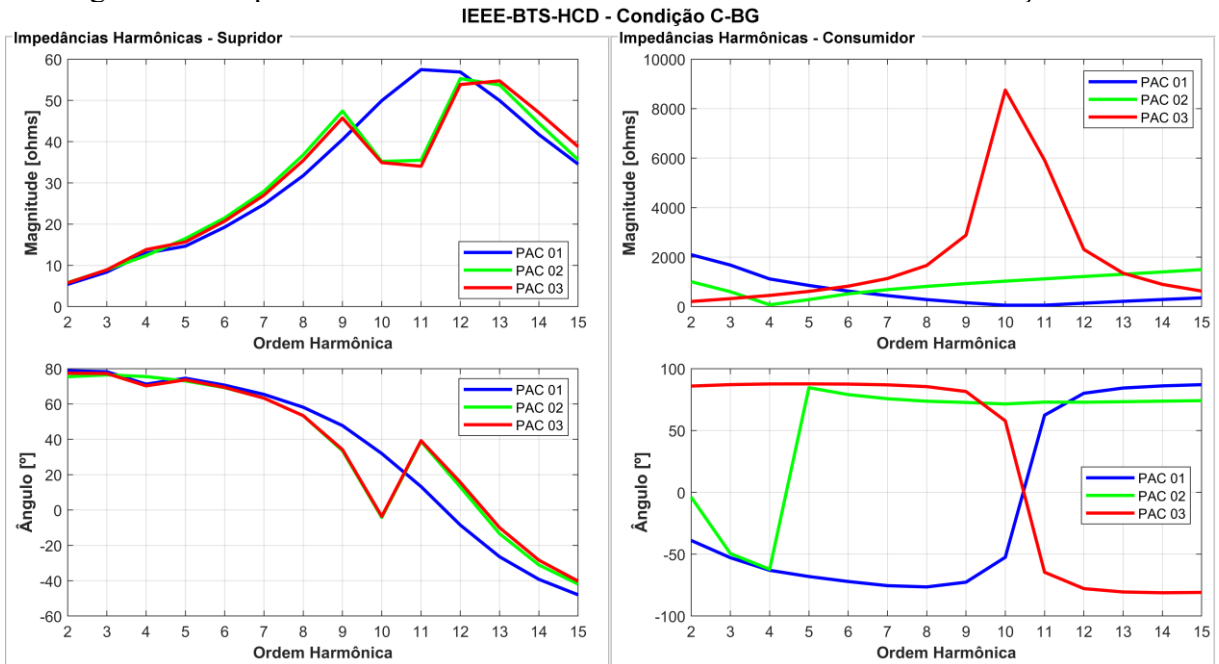
Fonte: Autoria própria.

Figura 48 – Impedâncias harmônicas medidas no IEEE-BTS-HCD - Condição B-BG.



Fonte: Autoria própria.

Figura 49 – Impedâncias harmônicas medidas no IEEE-BTS-HCD - Condição C-BG.



Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C. PRODUTOS

Nessa seção estão listados os produtos gerados a partir da presente tese de doutorado. Aqueles em destaque são os produtos diretos, e os demais, indiretos.

- **Artigos em periódicos**

- **B. M. Giancesini, I. N. Santos, e P. F. Ribeiro, "Comparison of Methods for Determining Harmonic Distortion Contributions Using the IEEE Benchmark Test System," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, no. 4, pp. 2398-2407, Aug. 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2023.3242942.**
- R. C. F. Gregory, V. H. F. Brito, B. M. Giancesini e I. N. Santos, "Desafios da Medição Harmônica no Sistema Elétrico de Potência: a influência da resposta em frequência de Transformadores de Potencial," in O Setor Elétrico, vol. 194, pp. 64-65, 2023.

- **Artigos em congressos/conferências**

- **B. M. Giancesini, I. N. Santos, J. C. de Oliveira, e F. A. de Oliveira, "Reflexões associadas com a proposição de protocolo para aplicação de metodologias de compartilhamento de responsabilidades harmônicas", in XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), 2023.**
- H. C. de Oliveira, C. O. Dias, B. M. Giancesini, e I. N. Santos, "Avaliação computacional e aplicação em campo do Método do Chaveamento de Capacitores para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas", in XV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE), 2023.
- G. M. de Carvalho, K. N. Cunha Silva, B. M. Giancesini, e I. N. Santos, "Avaliação do Método IEC para compartilhamento de responsabilidades harmônicas utilizando o IEEE Benchmark Test System", in XV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE), 2023.
- L. B. Silva, B. M. Giancesini, e I. N. Santos, "Comparação de Procedimentos para a Agregação Temporal dos Ângulos de Fase das Componentes Harmônicas", in XV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE), 2023.

- B. M. Giancesini, I. N. Santos, E. B. de Alvarenga, e E. J. B. N. dos Santos, “Tutorial para estimação de impedâncias harmônicas no MATLAB/*Simulink*”, in XV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE), 2023.
- I. N. Santos, B. M. Giancesini, G. S. Troncha, R. C. F. Gregory, C. R. de Azevedo Jr, e V. H. F. Brito, “Application of a Methodology for Determining Voltage Harmonic Contributions in a Low-Voltage Busbar”, in 2022 Cigre Session, 2022.
- V. H. F. Brito, B. M. Giancesini, e I. N. Santos, “Avaliação da representação de cargas não lineares na aplicação de metodologia para compartilhamento de responsabilidades harmônicas”, in XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE), 2021.

- **Depósitos de patentes**

- I. N. Santos, A. C. Santos, J. C. Oliveira, R. C. F. Gregory, G. S. Troncha, C. R. Azevedo Junior, B. M. Giancesini, A. F. Bonelli, E. M. Vaciloto, M. L. Bonelli, C. F. Chaves. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020210189100, título: "SISTEMA DE USO DO MÉTODO DA IMPEDÂNCIA DOMINANTE (MID), E, EQUIPAMENTO", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 22/09/2021.